

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**LA RELATIVITÀ DELLA SIMULTANEITÀ:
ANALISI DELLE DIFFICOLTÀ DEGLI
STUDENTI E UTILIZZO DI UN TUTORIAL
COME METODO DIDATTICO PER UN
APPRENDIMENTO ATTIVO**

Relatrice:

Prof.ssa Olivia Levrini

Correlatrice:

Prof.ssa Sara Satanassi

Correlatore:

Prof. Giovanni Pettinato

**Presentata da:
Francesco Bolognesi**

Sommario

In questa tesi viene presentata un'esperienza di insegnamento che utilizza un Tutorial didattico per favorire la comprensione della relatività della simultaneità. Le difficoltà riscontrate nella comprensione di questo argomento e il loro superamento sono stati analizzati prendendo come riferimento un gruppo di studenti universitari e una classe di quinta superiore di un Liceo scientifico, osservata nell'intero percorso sulla relatività ristretta.

Dopo aver analizzato le potenzialità del Tutorial con il gruppo di studenti universitari, esso è stato tradotto e modificato per essere utilizzato con studenti di Liceo, esaminandone l'efficacia rispetto ad un insegnamento frontale dello stesso argomento tramite test finali di verifica. I risultati sono compatibili con la letteratura (Scherr et al., 2001, 2002), riscontrando un miglioramento significativo nella comprensione dei concetti di base e nella coerenza dei ragionamenti.

Indice

1. La relatività ristretta nella ricerca in Didattica della Fisica	3
2. Analisi di materiali didattici basati sulla ricerca	8
2.1) I tutorial come strumenti didattici: Simultaneity	8
2.2) Il problema dei vulcani come strumento di valutazione formativa	12
3. Analisi dei materiali con studenti universitari	15
3.1) Percorso a lezione prima dell'attività didattica	15
3.2) Esposizione del problema dei vulcani	16
3.3) Somministrazione del tutorial	17
3.4) Raccolta di feedback	18
3.5) Rielaborazione del materiale	21
4. Studio con studenti di scuola secondaria di II grado	24
4.1) Contesto scolastico e percorso in classe	24
4.2) Pre-test, Tutorial e post-test	25
5. Risultati	27
5.1) Analisi delle riflessioni stimulate dal Tutorial	27
5.2) Confronto in una singola classe tra pre-test, e post-test	30
5.3) Confronto tra due classi	33
6. Conclusioni	44

Introduzione

La relatività ristretta è controintuitiva: fin dalla sua prima formulazione, nell'articolo "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" ("Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento") del 1905, essa ha messo in discussione la visione "assoluta" dei concetti di spazio e di tempo, e ha fatto emergere effetti relativistici dello spazio e del tempo che sfidano l'intuizione.

Questa tesi si è concentrata sulla relatività della simultaneità. Si tratta di un concetto che cambia radicalmente la nostra comprensione sulla natura del tempo e fa capire quanto sia fondamentale parlare di spazio-tempo e non di due entità separate. La comprensione della relatività della simultaneità non è utile solamente a coloro che intendono proseguire gli studi prettamente teorici, in discipline come relatività generale o astronomia. È anche utile per le applicazioni nel campo della fisica sperimentale, soprattutto nella fisica delle particelle e, più in generale, per una cultura di base.

La relatività della simultaneità è una diretta conseguenza dell'invarianza della velocità della luce, che dimostra che due eventi simultanei per un osservatore non lo sono per un altro in moto rispetto al primo. Non c'è dunque da stupirsi che la relatività della simultaneità, che in molti libri di testo è trattata come primo effetto relativistico, subito dopo l'introduzione dei postulati relativistici, crei disorientamento tra studenti di scuola superiore ma anche tra studenti universitari. È infatti noto ai ricercatori in didattica della fisica come molti studenti abbiano una convinzione profondamente radicata che la simultaneità sia assoluta e che tutti gli osservatori (in ogni sistema di riferimento) siano concordi sull'ordine temporale di due eventi (Scherr et al., 2002).

Questa tesi ha come obiettivo quello di esplorare metodologie didattiche per insegnare in classi di liceo italiane il concetto di relatività della simultaneità diverse dalle lezioni frontali, analizzandone vantaggi e svantaggi. Un altro obiettivo è quello di valutare l'efficacia di questi materiali didattici in un contesto diverso da quello universitario per il quale sono stati ideati, usandoli in una classe di una scuola secondaria di II grado.

Dopo aver analizzato la letteratura di ricerca sulle principali difficoltà degli studenti nello studio della relatività della simultaneità e aver raccolto strumenti didattici innovativi, è stata condotta un'indagine preliminare all'università con lo scopo di vedere in azione l'uso di un Tutorial didattico e di coinvolgere i colleghi nell'attività di analisi, discussione e rielaborazione del Tutorial stesso.

La fase preparatoria si è conclusa con il riadattamento dei materiali didattici, dopodiché è iniziato lo studio al Liceo scientifico E. Fermi di Bologna, dove si è monitorata l'attività didattica di una classe e sono state somministrate prove diagnostiche e prove finali di verifica. Attraverso il confronto con una classe che ha ricevuto un insegnamento tramite lezioni frontali dello stesso argomento, si è anche potuto indagare quanto il metodo didattico scelto potesse avere influito sulle conoscenze acquisite dagli studenti.

Il lavoro di questa tesi è suddiviso in cinque capitoli: nel primo sono riportati i principali risultati della ricerca in didattica della fisica riguardanti la relatività della simultaneità, sui quali si basano i materiali didattici descritti in dettaglio nel secondo capitolo, in particolare il Tutorial dell'università di Washington, intorno al quale si sviluppa tutta la tesi. Nel terzo e nel quarto capitolo vengono descritti, rispettivamente, le esperienze svolte in ambito universitario e nella scuola secondaria di II grado. Infine, nell'ultimo capitolo si mostrano i risultati ottenuti.

Capitolo 1

La relatività ristretta nella ricerca in Didattica della Fisica

Nell'insegnamento della fisica, la relatività ristretta è spesso presentata come prima teoria che sfida le concezioni di base della fisica classica, rappresentando, sia a livello storico che a livello didattico, una spaccatura rispetto a quanto già noto precedentemente. La ricerca in Didattica della Fisica ha indagato in modo approfondito le difficoltà degli studenti e il loro modo di ragionare nell'ambito della relatività ristretta, sviluppando nuovi approcci e metodi di insegnamento che tengano conto delle difficoltà concettuali della teoria. Le ricerche sulla relatività ristretta in Didattica della Fisica sono numerose ed esplorano diverse tematiche, ma in questa tesi ci si concentrerà sulle difficoltà legate alla comprensione della relatività della simultaneità che, però, per essere affrontate richiedono che si affrontino con una certa attenzione i concetti di sistema di riferimento, evento, osservatore, postulati relativistici. Per comprendere la relatività della simultaneità, infatti, gli studenti devono aver compreso gli argomenti sopra citati, come mostra la progressione dell'apprendimento mostrato in Fig.1.1, tradotto da Alstein et al. (2021).

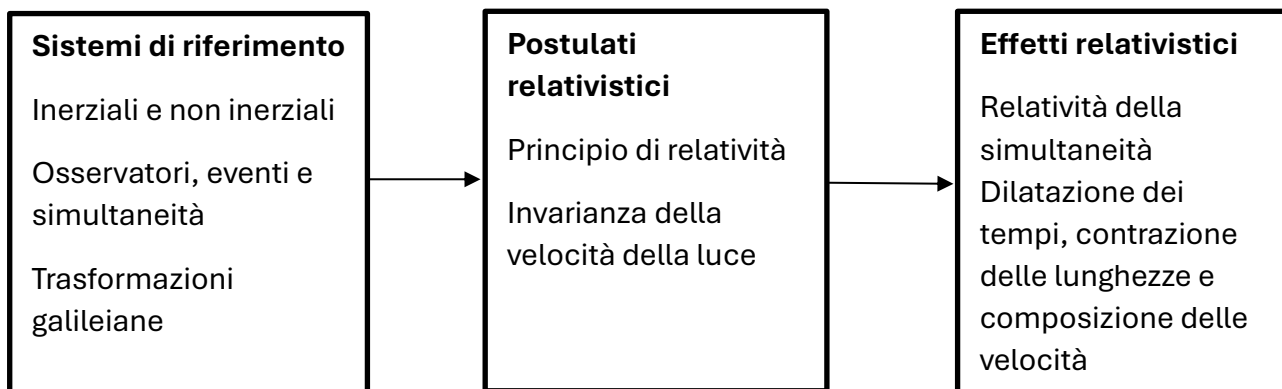


Fig. 1.1: rappresentazione schematica della progressione dell'apprendimento in un corso di relatività ristretta.

Di seguito si riportano i dettagli critici, messi in evidenza dalla ricerca in Didattica della fisica come fondamentali per la comprensione dei concetti che stanno alla base della relatività della simultaneità.

1) Sistemi di riferimento

La costruzione di un sistema di riferimento è fondamentale sia per la relatività galileiana che per quella ristretta: poiché questo termine può essere definito in vari modi, qui verrà usata una definizione operativa simile a quelle che compaiono più spesso nei libri di testo (Olsho, 2017): “un sistema di riferimento è una schiera tridimensionale di aste di lunghezza nota e di orologi sincronizzati, usata da un osservatore in quiete rispetto ad essa per misurare il tempo e la

posizione (coordinata spazio-temporale) di un evento.” Questa definizione di sistema di riferimento come reticolo di orologi sincronizzati è strettamente legata alla necessità di dare una definizione operativa di evento: un evento viene definito come un qualsiasi accadimento a cui si possano associare tre coordinate spaziali e una temporale, operativamente definite. Il tempo di un evento è registrato dall’orologio che si trova nel punto dove avviene l’evento stesso, mentre la posizione di un evento è data dalla posizione dell’orologio che ha registrato l’evento. Un osservatore ha il compito di leggere il tempo dall’orologio e di segnarsi la posizione dell’orologio: in questo modo, l’osservatore avrà misurato le coordinate spazio-temporali dell’evento. Gli osservatori che utilizzano il metodo del reticolo di orologi sono detti “intelligenti” (Scherr et al., 2002), perché sono in grado di determinare le coordinate spazio-temporali corrette di un evento nel loro sistema di riferimento.

Le difficoltà degli studenti nell’ambito dei sistemi di riferimento sono state studiate per la prima volta da Panse e colleghi (1994): innanzitutto, mostrarono come gli studenti tendono a considerare i sistemi di riferimento come se fossero concretamente degli oggetti fissati ad un corpo, estendendosi lungo le dimensioni del corpo stesso. Questo diventa problematico perché può condurre gli studenti ad associare alcuni eventi specifici con sistemi di riferimento specifici, come se un evento possa “appartenere” ad un solo sistema di riferimento, invece di poter essere osservato in uno qualsiasi. I ricercatori evidenziarono anche che alcuni studenti, anche dopo lo studio della fisica, continuano a privilegiare alcuni sistemi di riferimento (tipicamente, quello della Terra) e definendo “reali” i moti rispetto ad esso e i moti apparenti tutti i moti in sistemi di riferimento in moto rispetto a quello privilegiato.

Dalla definizione operativa di sistema di riferimento e dal metodo di misurazione delle coordinate spiegato precedentemente, consegue che tutti gli osservatori in quiete relativa fra loro si trovano nel medesimo sistema di riferimento, concordando sulle coordinate spazio-temporali di un qualsiasi evento. Questo implica anche che le misure di tempo non dipendono dal tempo che impiega la luce per giungere da un evento ad un osservatore, in quanto l’orologio a cui fa riferimento l’osservatore è sincronizzato con l’orologio situato nei pressi dell’evento. Diverse ricerche (Scherr et al., 2001, Scherr et al., 2001b, Olsho, 2017), con analisi statistiche condotte con popolazioni di studenti differenti, hanno dimostrato che la maggioranza degli studenti crede che un sistema di riferimento sia determinato dalla posizione di un osservatore, invece che dalla sua velocità. Tale convinzione non dipende dall’insegnante ed è diffusa in ogni grado scolastico. Di conseguenza, gli studenti considerano osservatori in quiete relativa che si trovano in punti differenti come se si trovassero in due sistemi di riferimento differenti, mentre osservatori che si trovano nella stessa posizione, ma in moto relativo, come se fossero nello stesso sistema di riferimento. Particolarmente forte è anche la tendenza ad associare il tempo di un evento con il tempo dopo il quale un osservatore riceve il segnale da quell’evento: se si considera ogni osservatore come un sistema di riferimento indipendente, isolato rispetto agli altri, si arriva alla conclusione che le sue misure riguardino la propria esperienza sensoriale e che gli effetti relativistici riguardino la differenza tra le misure effettuate da osservatori collocati in diverse posizioni (e non in diversi sistemi di riferimento in moto relativo). Sempre con questo ragionamento, si arriva alla conclusione che l’unico modo per misurare il tempo di un evento è

dunque proprio la ricezione di un segnale proveniente da quell'evento, quindi quanto più un osservatore si trova vicino ad un evento, tanto minore sarà il tempo da lui registrato.

Il passaggio di coordinate di un evento da un sistema di riferimento ad un altro è dettato, nel limite non relativistico, dalle trasformazioni di Galileo. In particolare, la distanza tra eventi non simultanei dipende dalla velocità relativa tra i sistemi di riferimento, mentre l'intervallo temporale tra due eventi è un invariante. Le difficoltà degli studenti nell'applicare le trasformazioni galileiane sono state studiate da J. Ramadas e colleghi (1996), scoprendo l'esistenza di ragionamenti basati sull'idea che la velocità sia una proprietà intrinseca di un corpo e la traiettoria descritta da un corpo non dipenda dal sistema di riferimento. Inoltre, gli studenti considerano invariante la distanza spaziale tra due eventi a prescindere che siano simultanei o meno.

II) Postulati relativistici

La teoria della relatività ristretta si fonda su due postulati: il primo, chiamato anche *principio di relatività*, afferma che le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali, estendendo il principio di relatività di Galileo all'elettromagnetismo e all'ottica. Il secondo afferma che la luce si propaga nel vuoto a velocità costante c , indipendentemente dallo stato di moto del corpo che la emette o che la osserva.

Dal primo postulato si deduce che tutti i sistemi di riferimento inerziali sono equivalenti, negando l'esistenza di un sistema di riferimento "privilegiato" rispetto al quale potersi definire fermi o in movimento. Diversi studi (M. Pietrocola & A. Zylbersztajn (1999), A. Bandyopadhyay (2009)) svolti con lo scopo di analizzare le difficoltà degli studenti hanno rivelato che alcuni studenti riconducono l'equivalenza delle leggi della fisica all'assenza di forze apparenti nei sistemi di riferimento inerziali, oppure al fatto che osservatori in diversi sistemi di riferimento inerziale concordino sulla velocità relativa tra loro. Oltre a ciò gli studenti non sembrano preoccuparsi della validità del principio di relatività nella risoluzione di un problema, mentre altri ancora lo considerano necessario per trattare una qualsiasi trasformazione di una grandezza fisica (inclusa la velocità). Il secondo postulato sembra destare meno difficoltà tra gli studenti, nonostante l'enorme importanza che ha nella comprensione dello spazio-tempo e il grande numero di conseguenze che ne derivano. Alcuni studenti credono che la "vera" velocità della luce possa essere misurata solamente nel sistema di riferimento a riposo con la sorgente di luce, quindi un osservatore che si trova in un altro sistema di riferimento misurerebbe una velocità differente.

III) Relatività della simultaneità

Nel suo articolo del 1905, Einstein mostrò che, considerando i due postulati relativistici come veritieri, si poteva dimostrare che due eventi simultanei in un sistema di riferimento inerziale S , in generale, non lo sono per un sistema inerziale in moto relativo S' : due eventi si definiscono simultanei in un sistema di riferimento se la separazione temporale tra i due eventi $t=t_2 - t_1$ è uguale a 0. Il secondo postulato influenza direttamente la sincronizzazione del reticolo di orologi utilizzato per misurare il tempo di due eventi: per sincronizzare due orologi in quiete in

S, si utilizza una sorgente luminosa posta a metà strada tra due orologi, come mostrato in Fig.1.2, che ad un certo istante viene accesa. Si possono sincronizzare gli orologi facendo segnare loro la stessa ora quando vengono raggiunti dall'onda elettromagnetica. Nel sistema S' , tuttavia, il processo è differente: in questo sistema di riferimento un orologio si sta avvicinando alla sorgente, mentre l'altro si sta allontanando, e poiché la velocità della luce è finita ed è la stessa per ogni osservatore, l'onda luminosa raggiunge un orologio prima dell'altro. Per questo motivo, i due sistemi di riferimento non concordano sulle misure di tempo effettuate da due orologi, cosicché la simultaneità tra gli eventi dipende dal sistema di riferimento scelto. In assenza dei postulati di Einstein, la velocità della luce si comporrebbe con quella del sistema di riferimento, quindi in S' gli orologi sarebbero sincronizzati come per S e il tempo risulterebbe assoluto come postulato alla base della relatività galileiana.

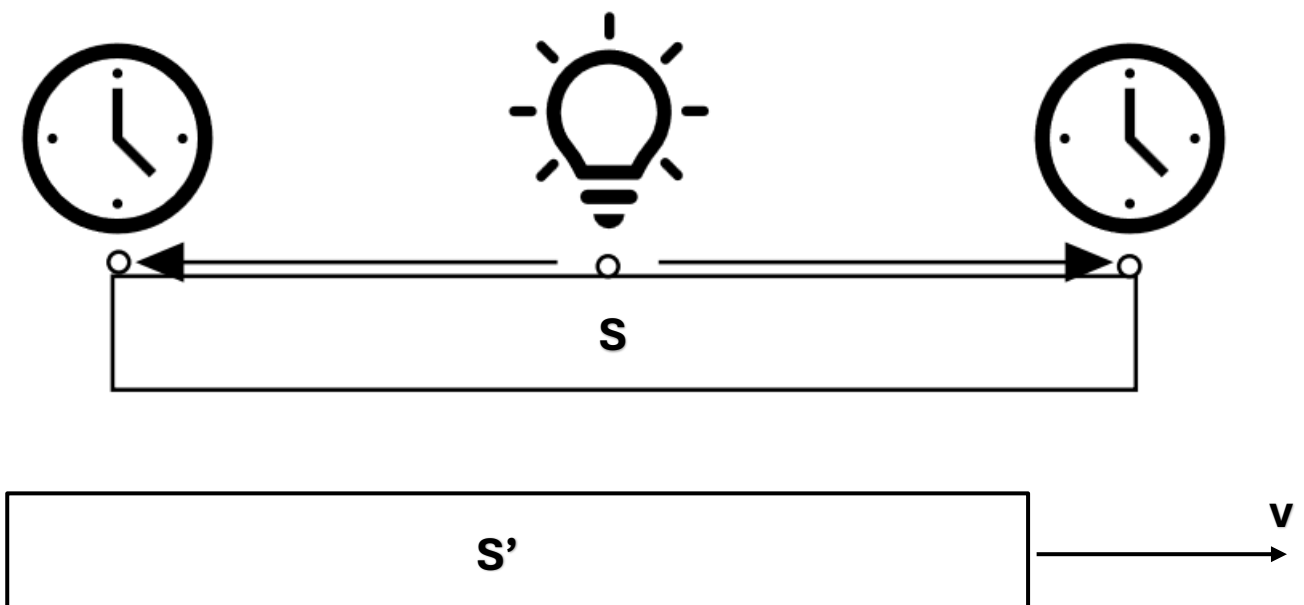


Fig. 1.2: schematizzazione della sincronizzazione di due orologi nel sistema di riferimento S . In basso, è disegnato il sistema di riferimento S' in moto rispetto a S con velocità v .

R. Scherr e colleghi hanno analizzato in modo approfondito le problematiche degli studenti per quanto riguarda la relatività della simultaneità (Scherr et al., 2001b; Scherr et al., 2002): gli studenti universitari, dopo un insegnamento tradizionale, costruiscono un proprio schema mentale dove le idee di simultaneità assoluta e relativa riescono a coesistere senza problemi. Le problematiche che gli studenti devono affrontare in questo ambito sono diverse: innanzitutto, gli studenti faticano a riconoscere spontaneamente che la simultaneità è relativa. Alla vista di due osservatori in moto relativo e di eventi che sono simultanei per uno dei due, raramente, se non viene chiesto esplicitamente, gli studenti ragionano in modo consapevole su cosa significhi e implichi che gli stessi eventi non sono simultanei per il secondo osservatore. Molto diffuso è il pensiero che la simultaneità, di per sé, sia assoluta e che la relatività della simultaneità sia una distorsione percettiva dovuta al diverso tempo che impiega un segnale per giungere ad un osservatore, considerazione che rimarrebbe valida nella fisica classica e che non spiega dove intervenga l'invarianza di c . Ciò indica che gli studenti faticano

a comprendere la procedura di misurazione delle coordinate spazio-temporali e l'importanza del reticolo di orologi.

Nel capitolo che segue si mostreranno alcuni materiali elaborati dalla ricerca in didattica della fisica per guidare gli studenti ad affrontare queste difficoltà e riflettere criticamente sulla relatività della simultaneità.

Capitolo 2

Analisi di materiali didattici basati sulla ricerca

2.1 I tutorial come strumenti didattici: *Simultaneity*

L'elemento centrale su cui si basa il lavoro descritto in questa tesi è il tutorial *Simultaneity*, prodotto dall'Università di Washington. Esso fa parte di una serie di Tutorial, ideati dall'Università di Washington, raggruppati sotto il nome di "Tutorials in Introductory Physics" che vengono proposti agli studenti come attività che affiancano le lezioni frontali in alternativa alle classiche esercitazioni. Questi tutorial sono concepiti come integrazione delle lezioni frontali. Si tratta di guide a lavori di gruppo, mediante le quali gli studenti sono condotti a confrontarsi nella costruzione di concetti, nello sviluppo di ragionamenti e nel collegamento del formalismo della fisica al mondo reale (Scherr et al., 2002). Prima di ogni tutorial, si svolge un breve pre-test composto da domande qualitative che richiedono di spiegare il proprio ragionamento. I tutorial sono pensati per essere completati in gruppi da 3-4 persone, in modo tale da favorire un coinvolgimento di tutti e l'analisi, mediante discorsi tra pari, dei principali nodi concettuali di un tema. Nello specifico, i tutorial sono costituiti da una serie di domande scelte accuratamente per guidare gli studenti attraverso il ragionamento necessario per sviluppare e saper applicare un certo concetto. Il post-test è una parte cruciale nell'analisi dell'efficacia di questo approccio, poiché osservando il miglioramento dei risultati tra pre-test e post-test, oltre che il confronto tra chi ha svolto il tutorial e chi non lo ha fatto, si può capire quanto l'uso del tutorial stesso come strumento didattico sia stato effettivamente utile alla comprensione dell'argomento. Spesso vengono condotte interviste tra gli studenti con lo scopo di capire meglio come articolano il proprio ragionamento. Nell'ambito universitario americano, sono presenti un certo numero di dottorandi (i cosiddetti "teacher assistants") che, durante la somministrazione del tutorial, possono aiutare studenti in difficoltà oppure, come indicato nel tutorial stesso, possono discutere con gli studenti sulla validità e sul significato dei risultati che hanno ottenuto. Rimanendo nel contesto americano, i corsi si possono suddividere in due grandi macrocategorie: "calculus based" e "non-calculus based" in base alla presenza o meno di un'analisi matematica formale approfondita. Dato che i tutorial sono forniti anche ai corsi "non-calculus based", si è pensato che essi potessero essere utilizzati anche in contesti di scuola secondaria di secondo grado, seppur riformulati per essere più adeguati ai tempi scolastici. Come si evince dal nome, *Simultaneity* è il tutorial che si concentra sulla relatività della simultaneità. In questa tesi, non verrà utilizzata la versione originale progettata da R. Scherr e colleghi nel 2001, ma quella dell'autunno 2009, arricchita dai ricercatori del Physics Education Group dell'Università di Washington a seguito del riscontro con gli studenti durante lo svolgimento di suddetto Tutorial. Spesso, all'interno del

Tutorial, viene richiesto allo studente di abbozzare un disegno per visualizzare il fenomeno che si sta analizzando, per poi rispondere ad alcune domande avendo come riferimento proprio il disegno appena realizzato, così che il ragionamento sia coerente con la rappresentazione grafica. In particolare, esso è diviso in 4 parti.

La prima parte si concentra sull'applicazione dell'invarianza della velocità della luce a un caso fisico piuttosto semplice, ovvero la propagazione del fronte d'onda emesso da una scintilla osservata in due sistemi di riferimento in moto relativo. Due osservatori, Alan e Beth, si muovono l'uno verso l'altra a velocità costante e, quando si incrociano, scocca una scintilla che emette un bagliore di luce. Agli studenti è chiesto di disegnare l'evoluzione temporale del fronte d'onda visto nel sistema di riferimento di Alan e di spiegare se è consistente con il fatto che la velocità della luce è la stessa in tutte le direzioni per Alan. Viene richiesto quindi di applicare un ragionamento simile nel sistema di riferimento di Beth, tenendo presente che anche per lei la propagazione della luce deve essere isotropa. In Fig.2.1 sono mostrati i disegni corretti.

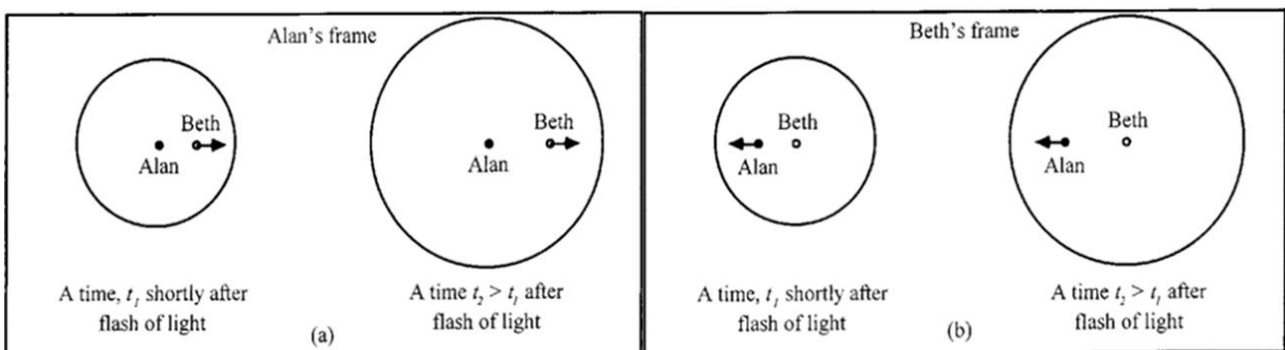


Fig. 2.1: Disegni corretti della prima parte del Tutorial. La circonferenza rappresenta il fronte d'onda provocato da una scintilla. Agli studenti è chiesto di disegnarlo per i due osservatori e in due momenti diversi (Scherr et al., 2002 p.1240).

La seconda parte si concentra sulla relatività della simultaneità, utilizzando un esperimento mentale simile al paradosso del treno di Einstein: Beth si trova al centro di un treno che si muove a velocità costante rispetto ad Alan, fermo vicino ai binari. Una scintilla scocca tra la testa del treno e il binario, un'altra scocca tra la coda del treno e il binario. Inoltre, ogni scintilla lascia una bruciatura visibile sul binario e sul treno. I bagliori generati dalle due scintille arrivano contemporaneamente agli occhi di Alan, che si trova equidistante dai segni di bruciatura sui binari. È presente anche una terza osservatrice, Abigail, ferma rispetto ai binari, vicino alla bruciatura lasciata dalla scintilla scoccata dalla testa del treno.

Il Tutorial richiede di disegnare i fronti d'onda dei bagliori di luce visti nel sistema di riferimento di Alan, poco tempo dopo lo scoppio delle scintille. Se gli studenti li disegnano correttamente, ovvero come due circonferenze della stessa grandezza centrate sulle due bruciature lasciate sui binari (Fig.2), potranno rispondere in modo corretto anche alla domanda successiva, ovvero l'ordine in cui i fronti d'onda raggiungono Beth. Viene richiesto, inoltre, l'ordine in cui

sono scoccate le due scintille per Alan e per Abigail, potendo concludere che per due osservatori in quiete relativa, l'ordine degli eventi è lo stesso.

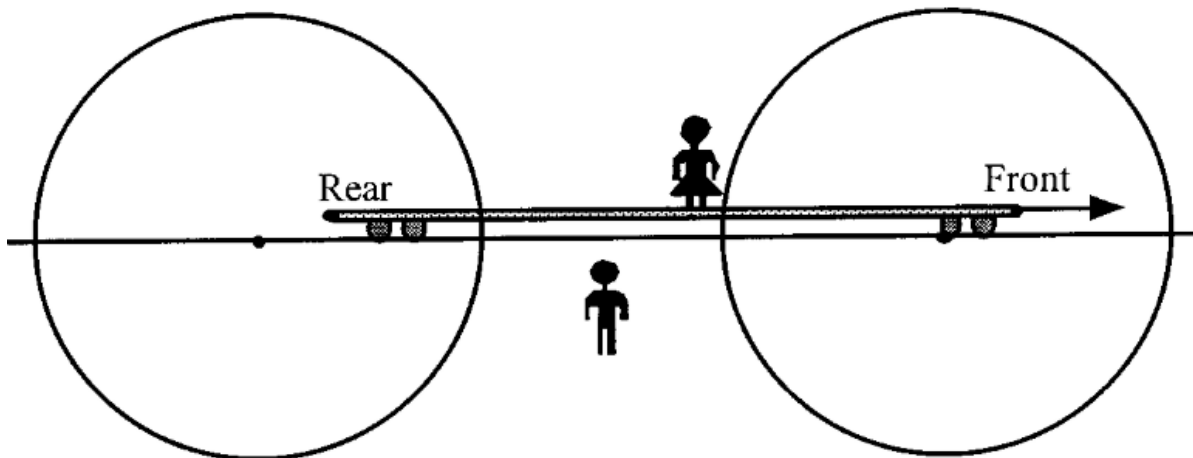


Diagram illustrating train, Alan, and Beth shortly after flashes.
(Alan's frame)

Fig. 2.2: Disegno corretto della seconda parte del Tutorial. Le circonferenze sono centrate sulle bruciature sui binari e sono di uguale grandezza (Scherr et al., 2002, p.1241)

Passando al sistema di riferimento di Beth, nella terza parte viene chiesto nuovamente di disegnare i fronti d'onda dei due bagliori di luce, di stabilire l'ordine in cui i fronti d'onda raggiungono Beth e di definire l'ordine dei due eventi. Per un ragionamento corretto, bisogna partire dal fatto che Beth, nel suo sistema di riferimento come in quello di Alan, viene raggiunta prima da un bagliore poi dall'altro e che, nel sistema di riferimento di Beth, il treno per Beth è fermo; dunque, i fronti d'onda sono circonferenze centrate alle estremità del treno. Tenendo presente che i fronti d'onda non arrivano simultaneamente, che Beth si trova equidistante alle bruciature lasciate sul treno, soprattutto, che la velocità della luce è uguale in tutti i sistemi di riferimento inerziali, bisogna allora concludere che per Beth le due scintille non sono avvenute contemporaneamente. Questo ragionamento, tuttavia, è particolarmente raro tra gli studenti, anche tra chi conosce la relatività ristretta (Scherr et al., 2002): molto più frequentemente, gli studenti tendono a considerare la simultaneità come assoluta e, di conseguenza, pensano che l'ordine con il quale i fronti d'onda raggiungono Beth dipenda dal sistema di riferimento scelto. La maggioranza degli studenti non disegna correttamente i fronti d'onda come in Fig.2.3, ma traccia due circonferenze di uguale grandezza come in Fig.2.4.

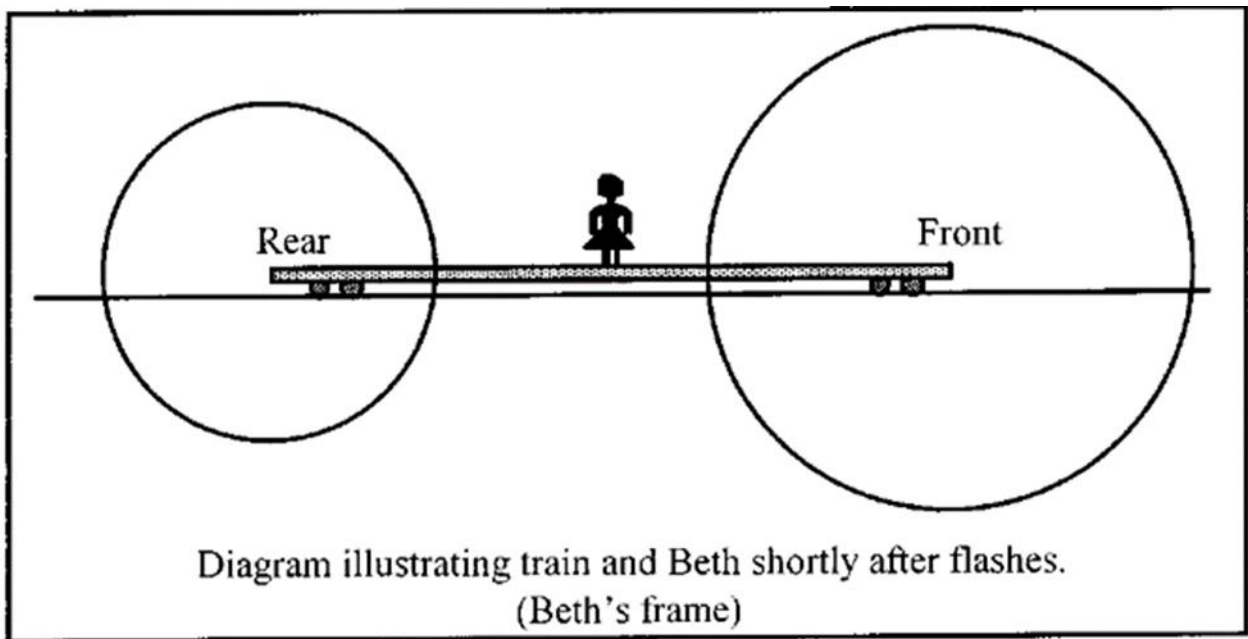


Fig. 2.3: disegno corretto dei fronti d'onda nel sistema di riferimento di Beth: le circonferenze hanno raggio diverso (Scherr et al., 2002, p.1243).

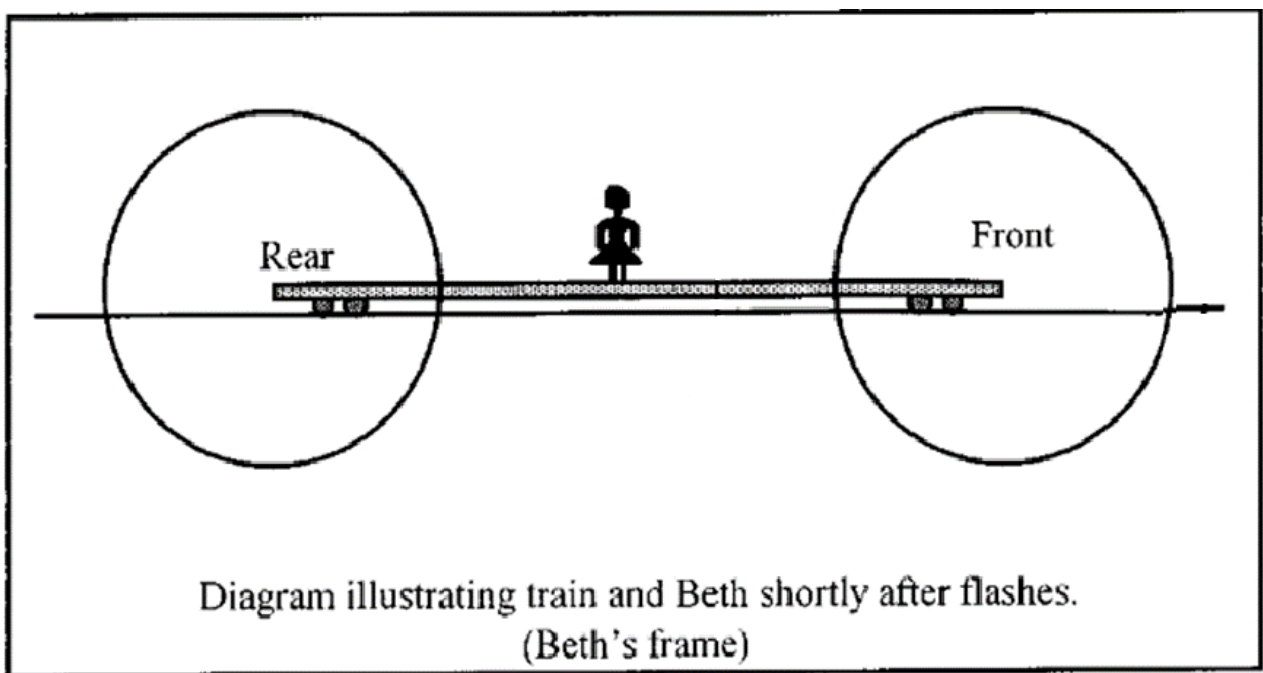


Fig. 2.4: disegno non corretto, ma più frequente, dei fronti d'onda nel sistema di riferimento di Beth: le circonferenze hanno lo stesso raggio (rivisitazione di Scherr et al., 2002, p.1243)

La quarta ed ultima parte, per correggere tale errore abituale, introduce un elemento di realtà: un dispositivo composto da due petardi appoggiato sul treno, ai piedi di Beth. Se i due fronti d'onda colpiscono il dispositivo contemporaneamente, entrambi i petardi esplodono. Al contrario, se esso viene colpito da un fronte d'onda prima che dell'altro esploderà un solo petardo. In questo modo, il focus del problema passa dal determinare l'ordine di due eventi (la ricezione dei fronti d'onda da parte di Beth) al capire se un singolo evento (lo scoppio di un petardo) accada oppure no. Il Tutorial richiede esplicitamente di scrivere quanti petardi esplodono nei due sistemi di riferimento, riportando anche una discussione tra due studenti che si confrontano sul fatto che un petardo possa, allo stesso tempo, esplodere o non esplodere a seconda di quale osservatore lo stia guardando. Infine, viene richiesto, partendo dall'ipotesi che un solo petardo esploda anche per Beth, di stabilire l'ordine degli eventi nel suo sistema di riferimento, cercando di capire il motivo dell'incompatibilità con quanto si era risposto precedentemente. Arrivato alla fine, lo studente dovrebbe essere in grado di affermare che la simultaneità non è assoluta, poiché un petardo inesplosivo deve rimanere tale in qualsiasi sistema di riferimento lo si stia osservando.

Sebbene il Tutorial possieda una struttura piuttosto guidata, anche con l'introduzione dell'elemento di realtà molti studenti non riescono a risolvere il paradosso individualmente (Scherr et al., 2002): la difficoltà principale sta nel capire che un evento fisico come lo scoppio di un petardo che avviene in un sistema di riferimento, deve avvenire anche negli altri. Per molti, la certezza che la simultaneità sia assoluta è talmente forte che non viene neanche presa in considerazione come possibile fonte di errore, affermando che un petardo debba esplodere e, allo stesso tempo, non esplodere a seconda del sistema di riferimento scelto. In questo modo, invece di concludere che la simultaneità sia relativa, si conclude che la relatività ristretta afferma che eventi che avvengono in un sistema di riferimento non necessariamente avvengono in un altro. Per spiegare questa bizzarra conclusione, alcuni studenti affermano che ogni sistema di riferimento rappresenta una realtà a sé stante, magari portando vaghe nozioni di meccanica quantistica a sostegno delle loro idee.

2.2 Il problema dei vulcani come strumento di valutazione formativa

Il cosiddetto "problema dei vulcani" (Scherr et al., 2001) è un esercizio molto noto nell'ambito della didattica della relatività ristretta: sviluppato dall'università di Washington, è stato concepito come strumento di indagine per capire quanto gli studenti avessero chiaro il concetto di relatività della simultaneità, come lo applicassero a situazioni fisiche basilari e in che modo provassero a determinare se due eventi sono simultanei per un osservatore. Nello specifico, esso è formato da tre quesiti, che prendono il nome dell'osservatore che si sta analizzando: la domanda sull'astronave, quella sull'esplosione e quella sul sismologo. I più significativi sono il primo e l'ultimo, quindi si è scelto di non includere il quesito sull'esplosione nelle trattazioni successive.

La situazione dei due problemi è molto simile: il Mt. Rainier e il Mt. Hood, che distano 300 km in un sistema di riferimento fermo rispetto a loro, improvvisamente eruttano emettendo un bagliore. Un sismologo, che si trova fermo in un laboratorio posto esattamente a metà strada tra i due vulcani, riceve i segnali luminosi dell'eruzione dei due vulcani nello stesso istante. A questo punto il quesito sul sismologo continua affermando che, alla base del Mt. Rainier, si trova un assistente del sismologo, fermo in un laboratorio. Il quesito sull'astronave, invece, introduce una navicella spaziale che si muove alla velocità relativistica costante di $0.8c$, dal Mt. Rainier al Mt. Hood.

La domanda sull'astronave è stata formulata, nella pubblicazione originale, in ben quattro diverse versioni: *undirected*, *directed*, *location-specific*, *explicit*. La differenza sostanziale tra le prime due e la terza sta nello specificare o meno la posizione dell'astronave rispetto ai due vulcani: la *location-specific*, infatti, afferma che la navicella si trova esattamente sopra al Mt. Rainier quando questo erutta, quindi percepisce quasi immediatamente il bagliore di quella eruzione. La quarta versione è un'evoluzione della terza, in quanto dichiara, in modo esplicito, che gli osservatori coinvolti sono "osservatori intelligenti", cioè che sono in grado di valutare il tempo di tutti gli eventi che avvengono nel proprio sistema di riferimento. La versione *explicit* è quella che è stata presa come riferimento dagli stessi autori nei loro studi successivi e sulla quale hanno indagato con un campione statistico più elevato. Inoltre, è proprio con questa versione che essi hanno verificato l'efficacia del Tutorial come strumento didattico, perciò è naturale che, in questo lavoro di tesi, si sia optato per il tipo *explicit* per poter confrontare i dati presi in una classe di quinta superiore con quelli presi dall'università di Washington (Scherr et al., 2002).

I due quesiti chiedono di determinare l'ordine con i quali avvengono i due eventi (l'eruzione del Mt. Rainier e del Mt. Hood), rispettivamente per l'assistente del sismologo e per l'astronave e di motivare la risposta. Per quanto riguarda l'assistente del sismologo, la domanda indaga su quanto gli studenti abbiano compreso riguardo sistemi di riferimento e simultaneità in un singolo sistema di riferimento: per rispondere correttamente, gli studenti devono capire il ruolo che ha un sistema di riferimento nello stabilire una coordinata temporale comune per gli osservatori in quiete relativa rispetto ad esso. Poiché il sismologo e l'assistente si trovano nello stesso sistema di riferimento, osservano lo stesso ordine di eruzione dei due vulcani. (Scherr et al., 2001). A causa della diversa posizione in cui si trovano sismologo e assistente, il bagliore dei due eventi impiegherà tempi diversi a raggiungerli: avendo, tuttavia, specificato che gli osservatori sono intelligenti, non ci sono dubbi sul fatto che siano in grado di affermare che gli eventi sono simultanei. Con questo quesito, si vuole capire quanti studenti prediligano la posizione, invece della velocità, per determinare se due eventi siano simultanei o meno.

Per quanto riguarda l'astronave, si può arrivare ad una risposta corretta ragionando in maniera qualitativa o quantitativa: qualitativamente, nel sistema di riferimento dell'astronave la luce delle due eruzioni viene emessa come due fronti d'onda sferici, centrati in due punti stazionari. Il sismologo, che riceve simultaneamente i due fronti d'onda, si sta muovendo insieme ai vulcani e, nel momento in cui riceve i due segnali, si trova più vicino all'origine del segnale partito dal Mt. Rainier: l'astronauta può concludere che il Mt. Hood ha eruttato per primo,

poiché il segnale ha percorso una distanza maggiore rispetto a quello mandato dal Mt. Rainier. La soluzione può essere data anche passando per le trasformazioni di Lorentz per il tempo: $\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x \right)$. In questo esercizio, $\Delta t' = t'_H - t'_R$ e $\Delta t = t_H - t_R$ sono gli intervalli di tempo tra l'eruzione del Mt. Hood e del Mt. Rainier nel sistema di riferimento dell'astronave e in quello del sismologo, v è la velocità dell'astronave rispetto al terreno e $\Delta x = x_H - x_R$ è la lunghezza propria di separazione tra i due vulcani. Prendendo come direzione positiva quella dal Mt. Rainier al Mt. Hood, $v > 0$, $\Delta x > 0$ e, poiché $\Delta t = 0$ (eruzioni simultanee per il sismologo), allora $\Delta t' < 0$, perciò, per l'astronauta, erutta per primo il Mt. Hood.

Oltre a studiare il ragionamento degli studenti quando si parla di simultaneità, i tre quesiti originali del problema dei vulcani sono stati usati anche come test da sottoporre agli studenti prima e dopo lo svolgimento di tutorial didattici, per verificare l'efficacia di questi ultimi. Nessuno studente riceveva la stessa versione di un quesito sia come pre-test che come post-test. Come si vedrà più avanti, si è cercato di replicare questa metodologia, con le dovute modifiche, in un contesto diverso da quello universitario. Scherr e colleghi, nella loro indagine statistica, hanno considerato corrette anche le risposte degli studenti che presentavano un ragionamento incompleto: in questa tesi, durante la correzione dei testi, si manterrà lo stesso approccio in modo tale che sia ragionevole un confronto tra i dati. In ogni caso, si terrà conto dei ragionamenti utilizzati per arrivare ad una risposta in un'analisi qualitativa a parte.

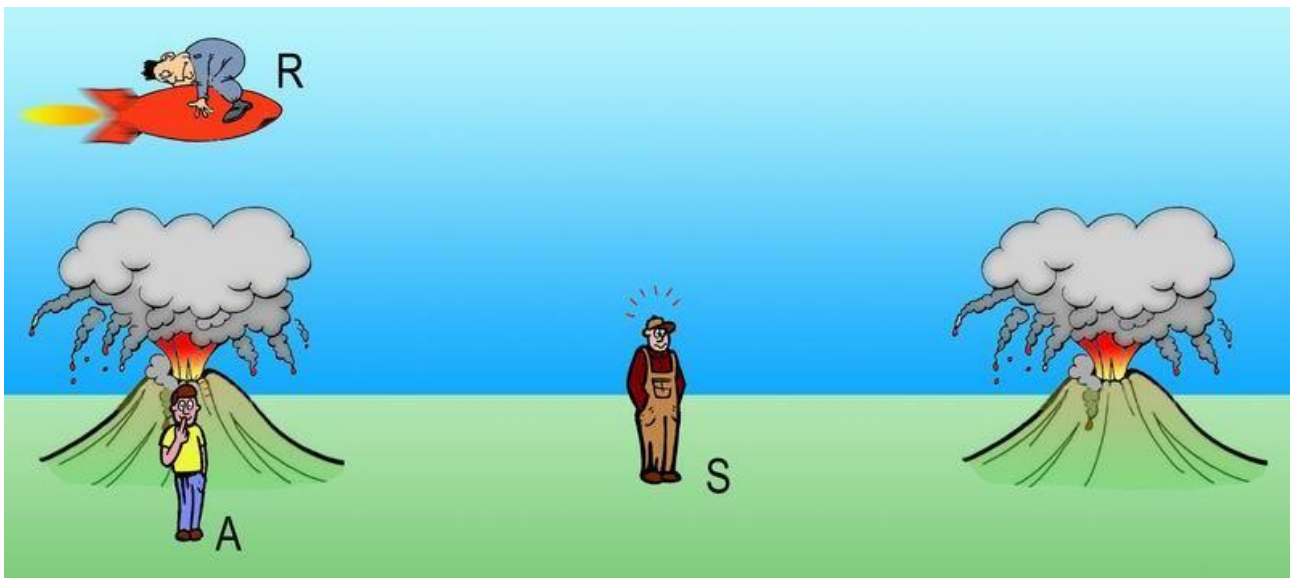


Fig. 2.5: schematizzazione del problema dei vulcani. A sinistra, il Mt. Rainier con l'assistente e l'astronave. Al centro il sismologo e a destra il Mt. Hood.

Capitolo 3

Analisi dei materiali con studenti universitari

Per poter adattare il tutorial *Simultaneity* e il problema dei vulcani al contesto della scuola secondaria di secondo grado, ho assistito ad alcune lezioni, riguardanti l'insegnamento della relatività ristretta, tenute dalla Prof.ssa Levrini alla Laurea Magistrale in Physics nel curriculum "Didattica e storia della fisica", descritte nel dettaglio nel paragrafo 3.1. Successivamente, gli studenti del corso sono stati coinvolti nello studio oggetto di questa tesi in un'attività della durata di circa 3 ore, suddivisa in tre momenti: inizialmente è stato svolto collettivamente il problema dei vulcani mentre io prendevo nota dei ragionamenti e dei dubbi che via via emergevano, riportati e analizzati nel paragrafo 3.2. Poi è stato somministrato il tutorial *Simultaneity* agli studenti: durante questa attività, mi sono limitato ad osservare il lavoro dei gruppi ascoltando le conversazioni tra gli studenti, approfondite nel paragrafo 3.3, dopodiché ho raccolto i tutorial completati. Infine, gli studenti hanno ricevuto dei *worksheet* da compilare affinché riflettessero sull'efficacia didattica del tutorial e dessero un feedback su di esso: alla fine dell'attività, ho ritirato i *worksheet* e li ho esaminati nel paragrafo 3.4.

3.1 Percorso a lezione prima dell'attività didattica

Ho iniziato a seguire le lezioni del corso "Didattica della Fisica" tenute dalla Prof.ssa Levrini inerenti all'insegnamento della relatività ristretta fondamentale per prepararmi alle attività successive di redazione della tesi, oltre che per avere un primo sguardo del contesto universitario in cui avrei fatto il mio intervento. Il primo argomento trattato è stato il confronto tra l'approccio razionalista di Taylor & Wheeler (1965) e quello storico-empirico di Resnick (1968) nell'affrontare la relatività ristretta nei libri di testo scolastici. In particolare, si è esaminato quello di Resnick dal momento che è stato utilizzato dalla maggior parte dei testi. Fondamentale in tal senso l'articolo originale di Einstein del 1905 "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", che ha ricoperto un ruolo di spicco durante le lezioni. In questo contesto è stata introdotta la definizione di tempo di un evento e di reticolo di orologi, passando poi ai postulati relativistici. Si è passato così alla relatività della simultaneità in una discussione collettiva basandosi sull'esperimento mentale del treno di Einstein, anche questo molto utilizzato per l'insegnamento della relatività ristretta.

3.2 Esposizione del problema dei vulcani

Il problema dei vulcani è stato presentato agli studenti universitari come un quesito da risolvere, chiedendo di motivare la propria risposta. Avendolo presentato come esercizio collettivo, non è stato possibile acquisire dati sulla percentuale degli studenti che avrebbe risposto in maniera corretta; tuttavia è bastato osservare il dibattito stimolato dal problema per capire la sua efficacia nel sollevare diversi nodi concettuali: la risposta corretta è stata individuata quasi subito da uno studente ma, nonostante ciò, molti altri dubitavano della validità della risposta ed è stata necessaria una riflessione approfondita per chiarire, almeno in parte, i dubbi.

Nello specifico, dalla discussione nata partendo dal problema è emerso che gli studenti hanno difficoltà a distinguere tra evento e fronte d'onda: poiché un qualsiasi osservatore non percepisce immediatamente il manifestarsi di un evento, ma solo il fronte d'onda che esso stesso genera e che si propaga nello spazio, molti studenti insistevano nel definire l'ordine in cui gli eventi accadono come l'ordine in cui i fronti d'onda raggiungono l'osservatore, confondendo dunque il tempo dell'evento con il tempo di ricezione del segnale di quello stesso evento. Questa distinzione è raramente trattata durante le lezioni di relatività ristretta, anche a livello universitario, quindi non c'è da stupirsi che il problema dei vulcani, appositamente ideato per toccare questo nodo concettuale, abbia sollevato molte perplessità. Anche Scherr e colleghi, tramite interviste individuali, avevano osservato come gli studenti tendessero a trattare la simultaneità in termini di ricezione del segnale, invece che di confronto tra i tempi degli eventi. In particolare, la domanda dell'astronave ha creato molte più difficoltà rispetto a quella inerente all'assistente del sismologo, come era già stato appurato con un campione statistico più rigoroso da Scherr et al. (2001): si convincono più facilmente che le due eruzioni siano simultanee anche per l'assistente del sismologo, in quiete relativa con il sismologo stesso, piuttosto che convincersi che per l'astronave il Mt. Hood erutti prima del Mt. Rainier. Per sostenere la propria idea, ovvero che l'ordine degli eventi dipenda dalla posizione dell'astronave, uno studente ha proposto uno scenario ipotetico in cui l'astronave parte da un punto lontano da entrambi i vulcani, non nello spazio tra i due vulcani, e si dirige verso il sismologo mantenendo la velocità impostata dal problema, come modulo, direzione e verso. In questo modo, l'astronave non si sta più allontanando dai bagliori provenienti dai due vulcani, ma si sta avvicinando ad entrambi e quindi, secondo lo studente, non esiste alcun modo per prediligere l'eruzione di un vulcano sull'altro, se non l'ordine con cui i fronti d'onda raggiungono l'astronave stessa. Un altro studente, focalizzandosi sulla posizione di un sistema di riferimento, invece che sulla sua velocità, ha suddiviso lo spazio del problema in tre diverse porzioni: la zona a sinistra del Mt. Rainier, quella a destra del Mt. Hood e quella compresa tra i due vulcani, prendendo come riferimento la Fig.2.5. In questo modo, secondo lo studente, la risposta al quesito dell'astronauta è determinata dalla posizione di quest'ultimo in una delle tre zone: se si trova a sinistra del Mt. Rainier sarà questo vulcano a eruttare per primo, se si trova a destra del Mt. Hood sarà il Mt. Hood a eruttare per primo, mentre se si trova nella zona intermedia il vulcano che erutta per primo sarà quello più vicino all'astronauta nel momento in cui questo riceve un fronte d'onda. Seppur sbagliate, queste risposte rivelano quanto gli

studenti facciano affidamento sull'ordine dei fronti d'onda per avere un metodo semplice e immediato per capire l'ordine temporale di due eventi.

Il problema afferma che tutti gli osservatori presenti sono "intelligenti", ovvero "sono in grado di osservare i fenomeni in modo scientificamente rigoroso e cioè sono in grado di valutare il tempo di tutti gli eventi che avvengono nel loro sistema di riferimento". In altre parole, per determinare il tempo di un evento distante, un osservatore corregge la misura del suo orologio per il tempo impiegato dal segnale per arrivare fino a lui, secondo la definizione di Einstein (A.Einstein: "Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento"). Sembra che non tutti gli studenti avessero compreso l'importanza di definire un osservatore "intelligente": senza questo dettaglio, la distinzione tra tempo dell'evento e tempo di ricezione perderebbe di significato; quindi, esso è fondamentale per capire che per l'assistente del sismologo l'eruzione dei due vulcani è simultanea a prescindere dall'ordine di ricezione dei fronti d'onda. Ciononostante, soltanto uno studente, dopo aver risposto in maniera errata alla domanda riferita all'assistente del sismologo, ha chiesto maggiori informazioni su questo argomento.

3.3 Somministrazione del tutorial

Dopo la discussione sul problema dei vulcani, si è somministrato il tutorial *Simultaneity* agli studenti, che lo hanno completato divisi in 7 gruppi da 4 o 5 persone in poco più di un'ora, non senza le attese criticità: il primo punto da sciogliere ha riguardato il problema della traduzione di alcune espressioni inglesi delicate che potevano essere oggetto di ambiguità. Anche la distinzione tra tempo dell'evento e tempo di ricezione ha stimolato riflessioni importanti, come ci si aspettava dopo l'esito del problema sui vulcani: le domande che chiedevano l'ordine in cui due fronti d'onda raggiungono un osservatore e, successivamente, l'ordine in cui i due eventi sono avvenuti, hanno inizialmente suscitato riflessioni per marcare la differenza tra le due domande. Come già scoperto da Scherr e colleghi (2001b), gli studenti spesso pensano che un sistema di riferimento sia determinato dalla posizione, piuttosto che dalla velocità; questa convinzione si è esplicitata nella riflessione su quanto l'ordine degli eventi nel sistema di riferimento di un osservatore fosse determinato dall'ordine con cui l'osservatore stesso riceveva i segnali da quegli eventi. Come previsto da Scherr e colleghi, la collaborazione tra pari e lo svilupparsi delle domande del Tutorial hanno ben guidato gli studenti ad esplicitare i nodi concettuali e a sciogliere i dubbi sulla differenza tra evento e informazione circa l'evento stesso.

Un problema minore, ma che ha fatto comunque discutere diversi gruppi, riguardava la posizione del centro di un fronte d'onda: se nel sistema di riferimento di Alan il centro era collocato su una bruciatura sui binari, non era per tutti immediato che, nel sistema di riferimento di Beth, il centro dovesse essere all'estremità del treno. Sebbene la 1° parte del Tutorial mostrasse proprio come il fronte d'onda fosse centrato in un punto diverso a seconda del sistema di riferimento scelto, è piuttosto intuitivo pensare che, se Beth si muove con il

treno, il centro sia in qualche modo “legato” ai binari, come visto da Alan, perciò alcuni ritenevano che il centro si dovesse trovare spostato, come mostrato in Fig.3.1.

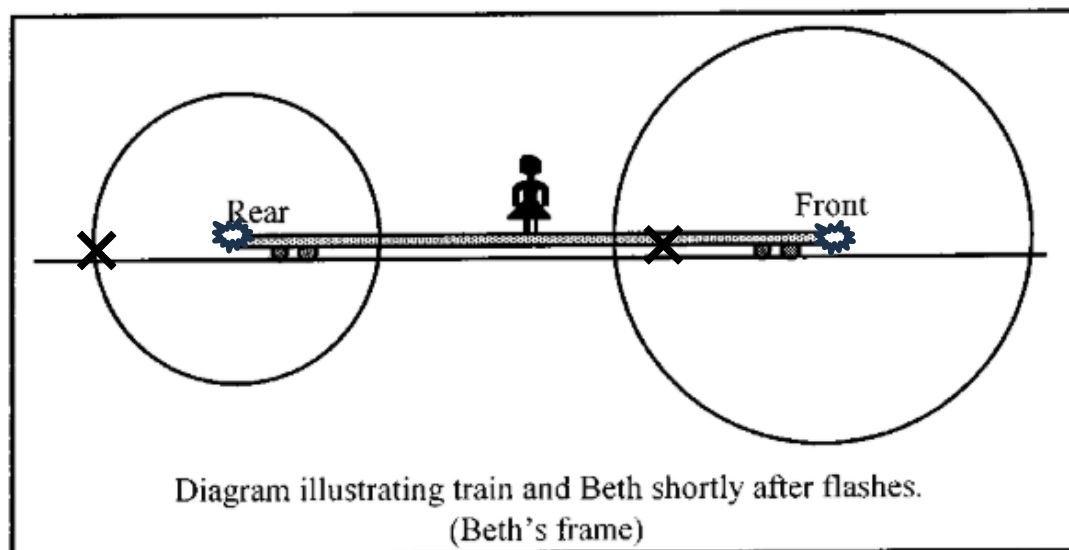


Fig. 3.1: disegno corretto dei fronti d'onda e dei loro centri, nel sistema di riferimento di Beth. Con una croce, si indica dove posiziona il centro chi ha sbagliato.

Come previsto da Scherr e colleghi, diversi gruppi hanno inizialmente considerato la simultaneità come assoluta nel passaggio da un sistema di riferimento all'altro, senza prestare particolare attenzione a questa scelta. L'elemento di realtà, dato dall'esplosione dei petardi, è stato fondamentale all'interno dei gruppi per generare una discussione costruttiva: chi aveva intuito che un petardo dovesse esplodere a prescindere dal sistema di riferimento considerato, e che quindi la simultaneità dovesse essere relativa, ha convinto gli altri della veridicità delle proprie idee, discutendo anche animatamente con gli altri membri del gruppo. Alla fine dell'attività, mi è sembrato che tutti avessero compreso la relatività della simultaneità, come confermato dai tutorial completati che mi sono stati restituiti.

3.4 Raccolta di feedback

A seguire, la dott.ssa Satanassi ha ripercorso in maniera approfondita le varie sezioni del Tutorial, analizzandone la struttura complessiva e il ragionamento che esso invita a fare. In questo modo, gli studenti potevano riflettere su eventuali errori commessi nel completamento del Tutorial e, contemporaneamente, comprenderne la struttura argomentativa e le motivazioni dietro all'inserimento di particolari domande.

Conclusa la riflessione proposta dal tutorial, abbiamo chiesto agli studenti di riflettere su di esso da un punto di vista didattico. Abbiamo progettato della domande per capire che cosa

pensassero del Tutorial, se lo considerassero un mezzo efficace di insegnamento e se avesse particolari punti di forza o criticità. Come la compilazione del tutorial, anche questa attività è stata pensata come un'attività di gruppo. In particolare, è stato chiesto loro di individuare:

- I) i principali nodi concettuali su cui il Tutorial è costruito;
- II) gli aspetti del Tutorial fondamentali per la comprensione dei nodi concettuali;
- III) gli aspetti superflui o ridondanti;
- IV) gli aspetti che possono essere modificati per guidare meglio gli studenti nel loro ragionamento.

Ai vari gruppi è stato fornito un foglio di lavoro con le domande che hanno poi consegnato al termine dell'attività. I risultati sono riportati in Tab.3.2, dove risposte simili sono state raggruppate in un unico tema.

Tab. 3.2: commenti relativi al Tutorial degli studenti di fisica in laurea magistrale.

<p>Quali sono i nodi concettuali principali su cui il Tutorial è costruito?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Significato di evento; - Definizione di sistema di riferimento; - Differenza tra tempo dell'evento e tempo di ricezione dell'evento; - Sistemi di riferimento in quiete relativa e in moto relativo; - Invarianza della velocità della luce; - Isotropia dello spazio; - Relatività della simultaneità.
<p>Quali aspetti del Tutorial ritenete che siano fondamentali per la comprensione dei nodi concettuali, ovvero senza i quali il ragionamento proposto dal Tutorial non reggerebbe?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - L'uso dei fronti d'onda, disegnati dal fruitore stesso del Tutorial, e del loro centro per capire che cosa vede un osservatore; - L'uso di termini diversi per distinguere evento e sua ricezione ("event... happen" e "wavefront... reach"); - Il livello di difficoltà crescente, con l'introduzione graduale di tutti gli elementi necessari alla comprensione; - L'elemento di realtà per introdurre il paradosso; - La discussione tra due ipotetici studenti per mostrare due differenti punti di vista.
<p>Quali aspetti del Tutorial trovate superflui, ridondanti, ingannevoli o fuorvianti e che si potrebbero eliminare?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La parte I del Tutorial, riguardante la simmetria dei fronti d'onda in diversi sistemi di riferimento, sembra sconnessa dal resto e costruita per ingannare;

	<ul style="list-style-type: none"> - I disegni a volte sono poco chiari: gli osservatori a cui si fa riferimento non sono sempre disegnati, due osservatori hanno la lettera “A” come iniziale del nome; - La domanda cruciale, ovvero la non simultaneità degli eventi per Beth, è presentata quasi subito al lettore, per farlo cadere nel tranello della simultaneità e correggerlo alla fine. Questo processo può avere effetti positivi sulla comprensione a posteriori ma può anche creare confusione; - L’ultima parte del Tutorial, in cui si ipotizza la non simultaneità degli eventi per sciogliere il paradosso, è una ripetizione delle parti precedenti.
<p>Ci sono degli aspetti nel ragionamento proposto che, secondo voi, possono essere modificati per guidare meglio gli studenti nel loro ragionamento?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Esplicitare dove e come interviene la costanza della velocità della luce; - Guidare maggiormente lo studente nell’individuare il centro del fronte d’onda; - Far capire l’importanza della grandezza del fronte d’onda; - Accorciare il Tutorial, pur mantenendo la struttura guidata. - Far chiarezza da subito sulla distinzione tra “evento” e “segnale”; - Il rapporto tra osservatori in quiete relativa è appena accennato: sarebbe bene concentrarsi maggiormente su questo aspetto o cancellarlo del tutto.

Il foglio di lavoro presentava un’ultima domanda, non riportata in Tab.3.2, che chiedeva agli studenti di costruire una versione alternativa e personale del Tutorial, che tenesse conto delle risposte precedenti per riformularlo in modo più chiaro e conciso pensando agli studenti di liceo come possibile target group. I vari gruppi hanno intrapreso strade differenti per migliorare il Tutorial, non discostandosi troppo dalla versione originale, ritenuta piuttosto valida, anche se migliorabile. Tra le proposte raccolte per quest’ultima domanda, la più significativa e ricorrente era il mantenimento della struttura generale del Tutorial, pur attuando qualche modifica alle singole domande: la parte I è quella che ha suscitato più dibattito, poiché sembra essere separata dal resto del Tutorial, nonostante in molti ritengano che sia utile per introdurre l’evoluzione temporale del fronte d’onda in diversi sistemi di riferimento. I sistemi di riferimento in quiete relativa sono appena accennati nella parte II, quindi c’è chi ha suggerito di espandere la domanda relativa a questo tema per approfondire il discorso, almeno inserendo un disegno

in cui appaia un osservatore in quiete relativa con un altro, oppure c'è chi, al contrario, ha proposto di eliminare completamente questa domanda, considerandola poco pertinente con il resto del Tutorial, che si concentra piuttosto sul concetto di simultaneità tra sistemi di riferimento in moto relativo. È stato particolarmente elogiato l'aspetto "fai da te": disegnare i fronti d'onda emessi da un bagliore è molto intuitivo, ma anche molto utile per avere una rappresentazione grafica da tenere a mente per capire meglio la situazione. Anche se nei libri di testo compare spesso la stessa immagine, il fatto che sia lo studente stesso a disegnare aiuta a consolidare maggiormente i concetti fisici che stanno dietro alla figura. I dialoghi tra studenti fittizi e la richiesta di riflettere sul tipo di argomentazioni da loro prodotte sono considerati un valido punto di partenza per attivare un dibattito all'interno dei gruppi. Infine, l'aspetto più apprezzato è stato l'elemento di realtà dato dall'esplosione dei due petardi: molti hanno affermato che, senza di esso, non sarebbero riusciti a capire i propri errori e avrebbero considerato la simultaneità come assoluta, non riscontrando un vero e proprio "paradosso" nel fatto che, a seconda del sistema di riferimento scelto, l'ordine dei fronti d'onda che raggiungono un osservatore sia diverso.

Dovendo trasporre il Tutorial da un contesto universitario americano ad uno scolastico superiore, un gruppo ha ragionato sulla trasformazione della figura del teacher assistant, cercando di sostituirlo proponendo una struttura a "checkpoint": l'idea è che il Tutorial sia diviso in blocchi, così che solo quando tutti i gruppi avranno raggiunto la fine di un blocco si comincerà a lavorare sul successivo. In questo modo, la discussione sui risultati ottenuti o su eventuali errori commessi non sarà più svolta all'interno dei singoli gruppi con un teacher assistant, ma sarà fatta con la classe nella sua interezza da me e dal docente.

3.5 Rielaborazione del materiale

Alla luce di quanto è emerso tra gli studenti universitari che hanno partecipato alle attività, è stata sviluppata una sua rielaborazione da proporre a una classe di quinta superiore. Una delle differenze fondamentali sta nei tempi necessari per completare il Tutorial: l'ambito universitario permetteva di svolgere attività più lunghe, senza risultare dispersive; quindi, il riadattamento scolastico avrebbe dovuto prevedere un tempo di compilazione minore, pur cercando di mantenere la stessa struttura argomentativa. Nella versione originale, gli studenti dovevano completare due Tutorial ("Events and reference frames", che ragiona su un singolo sistema di riferimento, e "Simultaneity") nell'arco di due ore di tempo. Questa trasposizione di "Simultaneity" doveva rientrare tassativamente in un'ora scolastica; perciò, si è cercato di mantenere soltanto le domande essenziali.

Il primo passo è stato tradurre l'intero Tutorial in italiano, prestando particolare attenzione alle parole chiave per la distinzione tra tempo dell'evento e tempo di ricezione del segnale ("happens" tradotto come "avviene" riferito a un evento, "wavefront...reaches" o

“wavefront...move” tradotto come “il fronte d’onda...raggiunge” e “il fronte d’onda...si espande”).

Spesso, nella versione americana, è richiesto allo studente di motivare le proprie risposte per iscritto, soprattutto relativamente all’ordine di eventi e fronti d’onda, mentre in questa rielaborazione si è scelto di chiedere un’argomentazione soltanto orale: anche se in questo modo sono stati raccolti meno dati relativi al ragionamento di ogni gruppo, questa scelta è stata necessaria per rientrare nei tempi scolastici. In ogni caso, durante l’esperienza in classe, sono state segnate per iscritto le risposte emerse da questo tipo di domande, così da riportare le frasi più significative.

La prima parte del Tutorial, riguardante l’espansione di un fronte d’onda visto in diversi sistemi di riferimento, ha ricevuto pareri contrastanti tra gli studenti universitari; quindi, si è scelto di lasciarla quasi invariata: sebbene, a prima vista, potesse sembrare fuori contesto, dopo un’analisi più approfondita si è pensato che potesse essere una buona introduzione per l’argomento trattato e che potesse far emergere nodi concettuali come l’invarianza della velocità della luce, l’isotropia dello spazio e la diversa visione di un fenomeno visto in due sistemi di riferimento diversi. L’originale richiedeva, da parte degli studenti, di disegnare i fronti d’onda e di rispondere ad alcune domande riguardanti la coerenza di tali disegni con i postulati relativistici: si è scelto di eliminare queste domande, permettendo agli studenti di commentare oralmente le loro scelte.

La seconda e la terza parte sono quella che sono state modificate maggiormente: le immagini sono state rese più chiare inserendo sempre sia Alan che Beth a prescindere dal sistema di riferimento che si sta osservando, le parole “fronte d’onda” ed “evento” sono state scritte in grassetto per evidenziare la differenza concettuale tra le due ed è stata espansa la domanda relativa ad Abigail: oltre ad averla rinominata Charles, per evitare confusioni date dal fatto che due osservatori erano indicati con “A”, è stata disegnata in modo esplicito vicino alla testa del treno. In più, oltre alla richiesta di individuare l’ordine degli eventi per Charles, è stata aggiunta una domanda in cui viene richiesto l’ordine dei fronti d’onda che lo raggiungono, così da capire quanti confondono la ricezione del segnale con il tempo dell’evento.

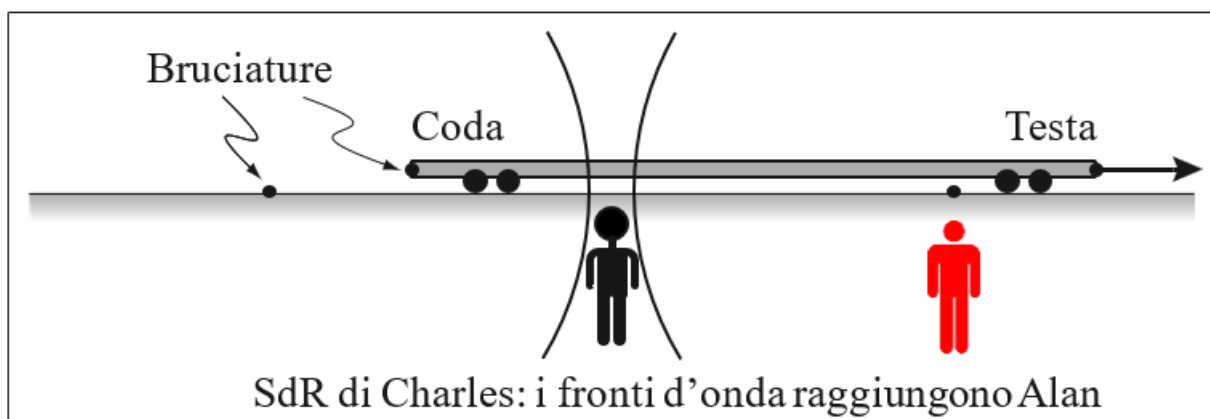


Fig. 3.3: disegno relativo al sistema di riferimento di Charles inserito nella nuova versione del Tutorial.

Siccome la localizzazione del centro del fronte d'onda, che per Alan è sui binari mentre per Beth è alle estremità del treno, è stata particolarmente ostica per gli studenti universitari, si è scambiato l'ordine delle due domande, chiedendo prima di individuare il centro del fronte d'onda e, successivamente, di disegnarlo.

Le domande relative all'ordine di eventi e fronti d'onda sono state riscritte come domande a risposta multipla, per renderle più intuitive e per facilitare l'analisi delle risposte una volta conclusa l'esperienza.

L'evento relativo ad Alan e Beth che passano l'uno davanti all'altro è stato eliminato, perché considerato superfluo e per non confondere gli studenti con un ulteriore evento da ordinare cronologicamente rispetto agli altri.

L'ultima parte, fondamentale per distruggere il concetto di simultaneità assoluta introducendo il paradosso dei petardi che esplodono e non esplodono, è stata lasciata pressoché invariata, per via della sua importanza nella struttura argomentativa.

Infine, come suggerito precedentemente, sono stati inseriti tre checkpoint per permettere, per quanto possibile, a tutti i gruppi di rimanere allineati nella risoluzione del Tutorial.

Il problema dei vulcani, invece, risultava soddisfacente già nella versione presentata agli studenti universitari: per questo motivo, non ha subito alcuna modifica rispetto alla versione originale pubblicata da Scherr e colleghi, se non la traduzione in italiano.

Capitolo 4

Studio con studenti di scuola secondaria di II grado

Per analizzare gli effetti della nuova versione del Tutorial sugli studenti, la ricerca si è spostata al liceo scientifico, vera meta dell'intero lavoro di tesi. Come già anticipato, il problema dei vulcani è stato usato come post-test per verificare le conoscenze acquisite dopo aver svolto il Tutorial. Infine, è stato realizzato un breve test sulla relatività galileiana da compilare prima del Tutorial, che verrà chiamato pre-test, per esaminare le conoscenze preliminari degli allievi.

4.1 Contesto scolastico e percorso in classe

L'attività è stata svolta in una classe quinta di un liceo scientifico, che verrà chiamata classe principale. L'intero lavoro è durato un periodo di tempo di quasi due mesi, tra aprile e maggio 2024, inclusa la mia osservazione di tutte le lezioni di relatività che hanno preceduto l'intervento sulla relatività della simultaneità.

La classe è composta da 17 alunni: una parte degli studenti segue una sperimentazione con potenziamento del bilinguismo con la lingua e la cultura cinese, mentre l'altra segue una sperimentazione con potenziamento dello studio dei linguaggi. Il professore di fisica segue la classe da 2 anni e ha a disposizione 3 ore settimanali. Il programma di relatività ristretta è stato svolto attraverso lezioni frontali, seguendo il percorso del libro di testo "La fisica di Cutnell e Johnson.azzurro" di John D Cutnell, Kenneth W Johnson, David Young, Shane Stadler, pur arricchendone il contenuto con diversi approfondimenti. Il programma completo svolto nelle ore di lezione è riportato in Tab.4.1.

Tab. 4.1: programma svolto in classe. Ad ogni riga corrisponde un'ora di lezione frontale.

Relatività galileiana e composizione classica delle velocità in sistemi di riferimento inerziali. Crisi della fisica classica e incompatibilità con la teoria elettromagnetica di Maxwell, interferometro di Michelson – Morley.
Le conseguenze dell'invarianza di c nei sistemi di riferimento inerziali: relatività della simultaneità, sincronizzazione degli orologi, dilatazione dei tempi spiegata con l'orologio a luce, contrazione delle lunghezze. Applicazione sulla vita media dei muoni e studio di funzione del fattore di Lorentz γ .
Trasformazioni di Lorentz, composizione delle velocità relativistica e caso limite per ricondursi alla composizione classica delle velocità. Effetto Doppler relativistico e caso limite per ricondursi alla formula classica.

I principi della dinamica nell'ambito della relatività ristretta, quantità di moto ed energia cinetica, energia a riposo, principio di conservazione massa-energia.

Spazio di Minkowski, invariante spazio-tempo ed energia-impulso.
--

A queste lezioni, si devono aggiungere diverse ore che il docente ha dedicato ad interrogazioni programmate, allo svolgimento di esercizi presi dal libro di testo e, soprattutto, un'ora dedicata al completamento del Tutorial tradotto e rivisitato. Durante le lezioni, l'insegnante spiegava l'argomento utilizzando la LIM, partendo quasi sempre da un punto critico della fisica classica, dimostrando come si giunga alla formula generale relativistica e come, nel caso limite, essa si possa ricondurre alla formula classica. È stato particolarmente curato anche l'aspetto matematico legato alla relatività, attraverso lo studio di funzioni per studiare il fattore di Lorentz e lo sviluppo in serie di Taylor per ricondurre l'effetto Doppler relativistico al caso classico. Durante le lezioni, la quasi totalità degli alunni prendeva appunti personali e prestava molta attenzione alla spiegazione del docente. L'argomento ha stuzzicato la curiosità degli studenti che in diverse occasioni ponevano domande, complici anche, probabilmente, gli effetti bizzarri e stupefacenti che la relatività ristretta porta con sé.

Il professore interrogava gli studenti a coppie, indicando un argomento del programma e chiedendo i principi fisici, le dimostrazioni e le applicazioni legati all'argomento.

Alcune ore sono state dedicate agli esercizi, in particolare prima della verifica, dove il docente risolveva alla lavagna problemi tratti dal libro di testo alla lavagna, spiegando il ragionamento che portava alla risoluzione e i concetti fisici sottesi ad ogni formula, riuscendo in questo modo a ripassare anche la teoria, facendo, eventualmente, domande alla classe per capire se avesse l'esercizio fosse chiaro.

Per verificare l'efficacia del Tutorial, è stata considerata un'altra classe quinta dello stesso liceo (seguita dallo stesso professore di fisica), anche se a indirizzo tradizionale, alla quale è stato sottoposto il problema dei vulcani senza che abbiano prima svolto il Tutorial: confrontando i risultati delle due classi, si può capire quanto l'uso del Tutorial come strumento didattico sia stato utile per la comprensione della relatività della simultaneità. Questa classe sarà chiamata classe secondaria. La classe secondaria non è stata seguita in modo approfondito, come invece si è fatto per la classe principale. In ogni caso, la si è ritenuta una classe confrontabile, dato che il docente di fisica è lo stesso e i programmi svolti nelle due classi sono gli stessi, così come il metodo didattico adottato dal professore per le lezioni.

4.2 Pre-test, Tutorial e post-test

Il problema maggiore emerso nel cercare di confrontare due classi parallelamente è il fatto che non procedessero di pari passo: quando ho iniziato a seguire la classe principale, infatti, quella secondaria era molto più avanti nel programma, tanto che erano già stati trattati argomenti cruciali per questo studio, come la relatività della simultaneità. Per questo motivo,

non è stato possibile svolgere il test sulle conoscenze preliminari nella classe secondaria. Fortunatamente, poiché le due classi erano seguite dallo stesso professore di fisica, è stato possibile chiedere al docente stesso se le due classi partissero dallo stesso livello o se una fosse superiore all'altra: egli ha affermato che, nonostante appartenessero a sezioni differenti, gli studenti delle due classi erano confrontabili come livello di partenza e che quindi aveva senso paragonare i risultati dei test finali tra le due classi.

Nella classe principale, la data del pre-test è stata precedentemente concordata con il professore, ma non con gli studenti. Prima di consegnare le prove, sono state spiegate le motivazioni che hanno portato alla creazione del test e le possibili applicazioni nella ricerca: sapere che le loro risposte avrebbero potuto essere d'aiuto a coloro che avessero studiato lo stesso argomento nel futuro li ha incoraggiati a svolgere il test con serietà. Inoltre è stato specificato che le prove sarebbero state anonime e che non avrebbero ricevuto alcuna valutazione, chiarendo che i test non sarebbero stati utilizzati per analizzare i singoli studenti, ma piuttosto per osservare l'andamento generale delle risposte e per costruire un quadro delle conoscenze pregresse. La calcolatrice non è stata vietata, anche se il suo uso era pressoché inutile (e infatti non è stata utilizzata da nessuno). Per rendere il test il più oggettivo possibile, dopo averlo consegnato, non ho risposto a nessuna delle domande poste dagli studenti.

Per il Tutorial, è stato utilizzato un approccio differente: la data è stata anticipata agli studenti, facendo presente l'importanza del progetto non solo per questo lavoro di tesi, ma anche per consolidare i concetti di un argomento particolarmente ostico come la relatività della simultaneità. Alla lezione in cui è stato presentato il Tutorial, solo un alunno era assente.

La data di svolgimento del problema dei vulcani (come post-test nella classe principale e come test di confronto nella classe secondaria) non è stata precedentemente concordata con gli alunni, sottolineando, ancora una volta, che il test sarebbe stato anonimo e privo di valutazione, ma che i risultati sarebbero stati utilizzati per questa ricerca e che quindi era richiesto il maggior impegno possibile. Nella classe principale erano assenti tre allievi, mentre in quella secondaria era presente la totalità degli studenti. È stato concesso l'uso della calcolatrice, anche se in pochi l'hanno effettivamente usata. Per ottenere un numero maggiore di dati, è stato fortemente richiesto di rispondere motivando la propria risposta, scrivendo il ragionamento utilizzato, i calcoli necessari ed eventuali dubbi che fossero sorti. In questo modo, oltre a verificare l'efficacia del Tutorial, è stato possibile analizzare le risposte e capire il ragionamento di chi ha risposto correttamente e di chi ha sbagliato.

Capitolo 5

Risultati

5.1 Osservazioni sui risultati del Tutorial

Avendo richiesto esplicitamente di non cancellare gli errori, ma soltanto di segnalarli e di scrivere anche la risposta corretta, è stato possibile individuare in quali domande del Tutorial gli studenti abbiano trovato maggiori difficoltà. Per riportare una visione sintetica dei risultati, ho costruito una tabella sulle diverse domande del tutorial, indicando, per ciascuna di esse, il numero di gruppi che ha risposto correttamente, su un totale di 6 gruppi. Per aiutare il lettore nella comprensione della tabella, le varie domande sono state raggruppate in base alla loro tipologia, poi ad ogni gruppo di domande è stato associato un colore: la parte introduttiva, riguardante l'espansione di un fronte d'onda visto in diversi sistemi di riferimento, è stata colorata di verde, quella relativa al sistema di riferimento di Alan in rosso, per le domande nel sistema di riferimento di Charles il blu, per quelle nel sistema di riferimento di Beth il rosa, mentre il bianco per le domande inerenti al confronto tra due sistemi di riferimento. Con il giallo, infine, sono state indicate le domande che il Tutorial pone quando viene ipotizzato che la simultaneità sia relativa (e che quindi un solo petardo esplode). Chiaramente, il ridotto campione statistico non ha permesso di fare un'analisi statistica delle risposte date: i dati riportati in tabella vogliono dare, piuttosto, un'idea generale sulle risposte degli studenti e su dove si concentrano le loro difficoltà.

*Tab. 5.1: risposte degli studenti alle varie domande del Tutorial. Diverse parti del Tutorial sono state indicate con colore diverso: in verde la parte introduttiva, in rosso il sistema di riferimento di Alan, in blu quello di Charles, in rosa quello di Beth, in bianco il confronto tra i due sistemi di riferimento, in giallo la parte in cui si ipotizza che un solo petardo esploda. *La risposta è considerata corretta semplicemente individuando i centri dei due fronti d'onda.*

	Quesiti	Risposta corretta (N=6)
Parte introduttiva sul concetto di evento	Disegno dell'evoluzione temporale del fronte d'onda nato da una scintilla tra Alan e Beth, disegnato in entrambi i sistemi di riferimento	5
Rappresentazione della situazione nel sistema di riferimento di Alan	Ordine degli eventi	5
	Disegno dei fronti d'onda	6
	Ordine con il quale i fronti d'onda raggiungono Beth	6

Rappresentazione della situazione nel sistema di riferimento di Charles	Ordine dei fronti d'onda che raggiungono Charles	6
	Ordine degli eventi	3
Rappresentazione della situazione nel sistema di riferimento di Beth	Disegno dei fronti d'onda*	2
	Ordine degli eventi	0
	Ordine con il quale i fronti d'onda raggiungono Beth	4
Confronto tra due SdR	Numero di petardi esplosi	0
Analisi del paradossi	Disegno dei fronti d'onda	5
	Ordine degli eventi	6
	Relatività della simultaneità	4

Per facilitare la lettura, i dati sono stati riportati anche nell'istogramma in Fig.5.2:

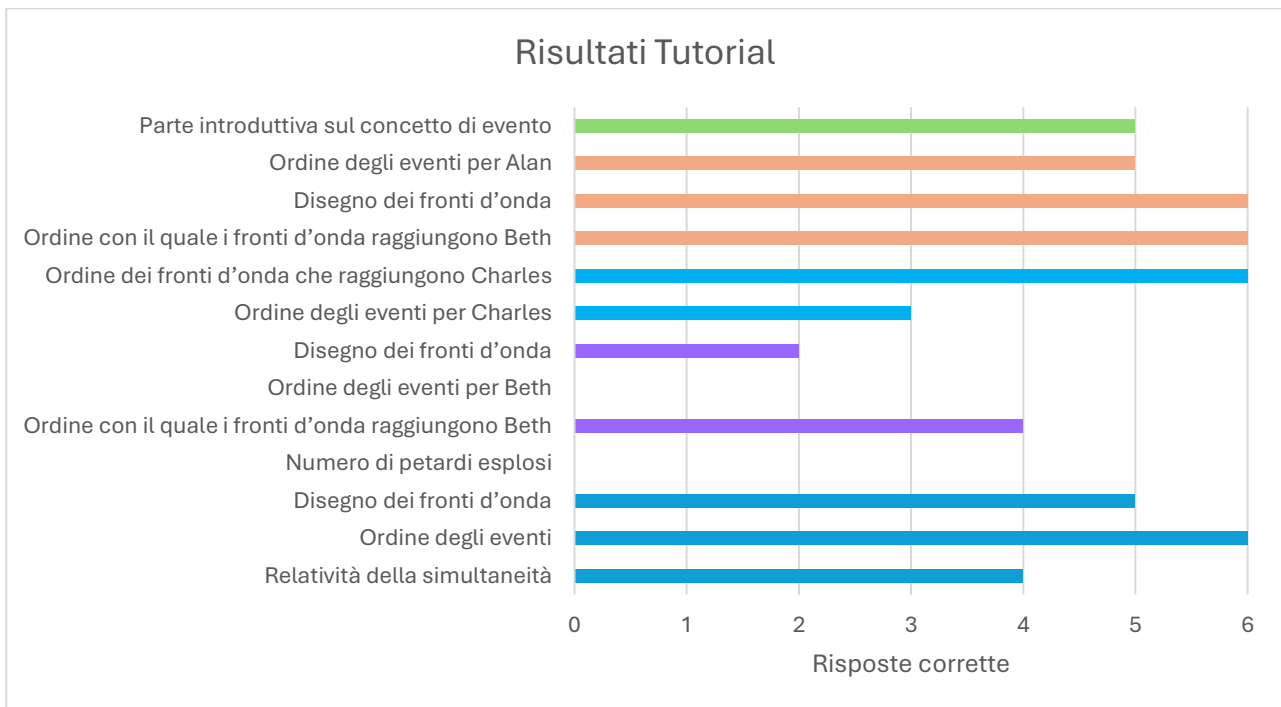


Fig. 5.2: istogramma delle risposte corrette dei 6 gruppi alle varie domande del Tutorial. Le varie parti del Tutorial sono state indicate con un colore diverso come indicato già in Tab. 5.1.

La prima parte del Tutorial, indicata con il colore verde, non ha creato particolari difficoltà: solamente un gruppo ha sbagliato a disegnare Alan e Beth, collocandoli a una distanza minore di quella di partenza allo scorrere del tempo, probabilmente mal interpretando il testo.

Anche le domande relative al sistema di riferimento di Alan, colorate in rosso nella tabella, non sono state problematiche: l'unico gruppo che ha sbagliato l'ordine degli eventi ha rivelato di aver misurato con il righello le distanze tra Alan e le bruciate e, notando qualche millimetro di tra una distanza e l'altra (a causa del disegno non perfettamente in scala), ha creduto che Alan non si trovasse perfettamente a metà strada tra un evento e l'altro e che quindi non fossero

simultanei. L'ordine con il quale i fronti d'onda raggiungono Beth, fondamentale per sciogliere il paradosso che si presenterà successivamente, è stato intuito correttamente da tutti.

I primi dubbi cominciano a sorgere nel sistema di riferimento di Charles, indicate con il colore blu in tabella: soltanto la metà dei gruppi ha riconosciuto la simultaneità degli eventi. Tutti gli altri non hanno saputo distinguere il tempo dell'evento dal tempo del segnale, affermando che, poiché Charles percepisce prima un fronte d'onda e poi l'altro, allora egli deve certamente concludere che le due scintille siano avvenute in momenti differenti. Questo risultato, in realtà, è abbastanza sorprendente: nei test condotti da Scherr e colleghi sul quesito del sismologo (che è perfettamente equivalente a questa domanda del tutorial, in quanto si parla di osservatori in quiete relativa) le risposte corrette si aggiravano intorno al 30%, per quanto riguarda gli studenti universitari americani di livello più basso. Sicuramente il campione ridotto di questo studio (formato solo da 6 gruppi) rende difficile un paragone diretto con quello americano, anche considerando il fatto che si sta confrontando un test per studenti singoli con un lavoro di gruppo. Tuttavia, è interessante notare come coloro che hanno risposto correttamente lo hanno fatto a seguito di una discussione all'interno del proprio gruppo, in cui chi sosteneva la simultaneità degli eventi provava a convincere gli altri con molta sicurezza.

Sul sistema di riferimento di Beth, indicato dal colore rosa, ci si aspettavano molti errori: tutti i gruppi sono caduti nel "tranello" ideato dal tutorial, ovvero hanno considerato la simultaneità come assoluta, partendo dal presupposto che anche per Beth le due scintille fossero scoccate contemporaneamente. Chiaramente, questa ipotesi si riflette sul disegno dei fronti d'onda, rappresentati come circonferenze dello stesso raggio a causa della simultaneità dei due eventi; quindi, tutte le figure rappresentavano fenomeni fisici sbagliati. Per questo motivo, quando è stata valutata la correttezza dei disegni, si è posta l'attenzione solamente sulla posizione dei centri delle circonferenze: la maggior parte dei gruppi ha posto l'origine delle scintille sui binari, invece che alle estremità del treno, privilegiando inconsapevolmente il sistema di riferimento di Alan, l'unico in cui si vedrebbero le scintille originarsi da punti stazionari. Questo errore era già stato osservato nella precedente esperienza universitaria; tuttavia, a differenza degli studenti universitari, quelli del liceo non riuscivano a credere alla figura corretta, nonostante i miei diversi tentativi di spiegazione. Nei loro ragionamenti sembrava intrinseca l'idea che Alan si trovasse nel sistema di riferimento "corretto" e che quindi le sorgenti dei bagliori negli altri sistemi di riferimento dovessero essere le stesse che vede Alan.

Chiaramente, presupponendo che la simultaneità fosse assoluta, tutti i gruppi concordavano sul fatto che il numero di petardi esplosi dipendesse dal sistema di riferimento dell'osservatore.

Quando invece si è ipotizzato che un solo petardo esplodesse in entrambi i sistemi di riferimento, nelle domande conclusive del Tutorial raggruppate con il colore giallo, molti sono riusciti a terminare il tutorial correttamente, concludendo che due eventi avvengono a tempi diversi o simultaneamente a seconda del sistema di riferimento. Per tutti gli altri, è stato più intuitivo pensare che un petardo potesse, a seconda dell'osservatore, esplodere e non esplodere, piuttosto che credere che due eventi potessero essere simultanei in un solo sistema

di riferimento: quando è stata condivisa la risposta corretta, questi studenti sembravano molto confusi, chiedendo esplicitamente: “come è possibile che le scintille per Beth non siano simultanee? Siamo partiti proprio dall’ipotesi che fossero simultanee!”. La spiegazione che è seguita è sembrata aver convinto solo in parte del fatto che la simultaneità fosse relativa.

Gli esercizi svolti successivamente hanno dimostrato che parte degli studenti fosse riuscito a riconoscere immediatamente che la simultaneità è relativa, anche quando non veniva esplicitamente richiesto, mentre altri erano ancora fortemente legati alla concezione di simultaneità assoluta.

5.2 Analisi dei miglioramenti in una singola classe (pre-test, post-test)

Anche se il test sulle conoscenze preliminari di relatività galileiana è stato svolto solo nella classe principale come pre-test, e quindi non è stato possibile confrontare le due classi da questo punto di vista, si è comunque potuto analizzare le risposte per capire il livello di partenza e i concetti che erano già presenti tra gli studenti. Dopodiché, si sono paragonate le risposte del pre-test con quelle del post-test (costituito dal problema dei vulcani) per capire se le lacune presenti prima di compilare il Tutorial fossero state, almeno in parte, colmate da questa esperienza didattica.

Il pre-test è formato da 6 domande a risposta multipla ed è stato messo a disposizione poco tempo per completarlo (10 minuti). Le prime due domande e l’ultima sono state prese e tradotte dal Relativity Concept Inventory (Aslanides & Savage, 2012), mentre le altre tre sono state ideate in questo studio. Le prime due domande richiedono di determinare la traiettoria di un corpo in caduta libera in due diversi sistemi di riferimento (inerziali). Per rispondere, è sufficiente possedere qualche nozione sul moto in diversi sistemi di riferimento, in particolare sul moto parabolico. Queste domande sono state inserite per vedere se gli studenti fossero in grado di mettersi nei panni di osservatori diversi per capire che cosa si vedesse in ogni sistema di riferimento, capacità molto utile nello studio della relatività ristretta. La terza e la quarta domanda sono semplici variazioni del treno di Einstein: invece di usare raggi di luce, si usano due cani che corrono in direzioni opposte partendo dalle estremità di un treno, come mostrato in Fig. 5.3, e si chiede se essi giungano contemporaneamente all’osservatrice sul treno e quale dei due cani passi per primo davanti all’osservatore fuori dal treno. Anche se molto semplici, queste due domande sono utili per introdurre il contesto del Tutorial che svolgeranno in seguito e per mostrare la controparte non relativistica dello stesso problema.

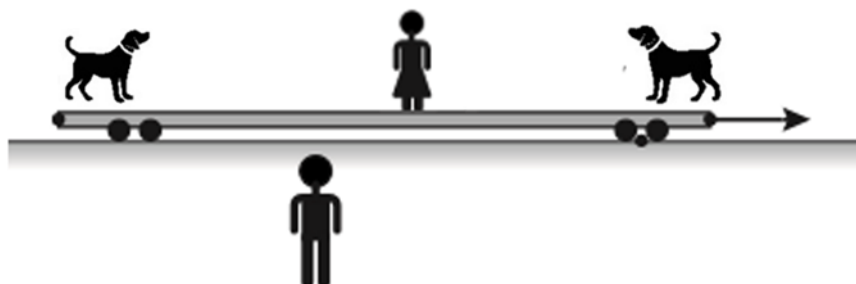


Fig. 5.3: rappresentazione grafica di due domande del pre-test.

La quinta domanda vuole indagare sulla distinzione tra evento e ricezione del fronte d'onda: un osservatore si trova tra due stereo, una più lontana dell'altra, che a mezzogiorno cominciano a suonare. Agli studenti viene chiesto se nel sistema di riferimento dell'osservatore l'accensione dei due impianti sia simultanea.

L'ultima domanda, ripresa dal Relativity Concept Inventory, chiede se sia possibile osservare un raggio di luce come quasi stazionario muovendosi a grande velocità, vicina a quella della luce stessa. Ovviamente, non avendo ancora sentito parlare di relatività ristretta, difficilmente uno studente poteva capire questa domanda, che è stata inserita per avere chiaro quanti, prima di studiarlo a lezione, pensino che la luce possa essere vista come ferma se ci si muove ad una certa velocità.

I risultati del pre-test sono riportati in Fig. 5.4.

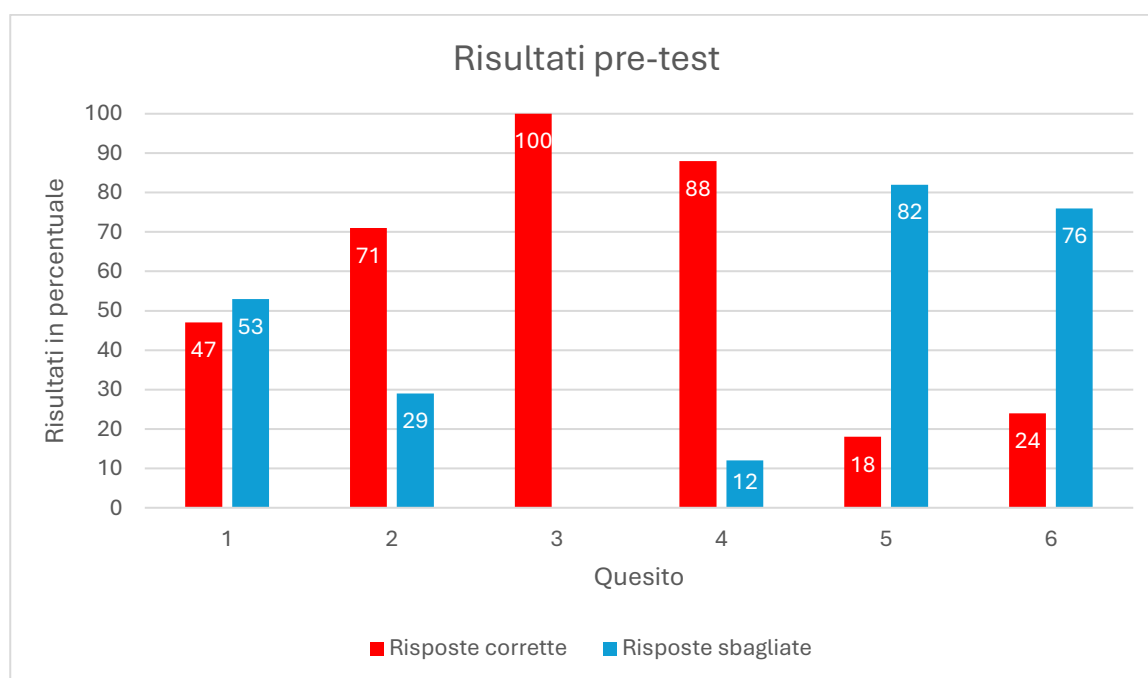


Fig. 5.4: risultati, in percentuale, degli studenti della classe principale nel pre-test. Gli studenti presenti erano 17.

I risultati sono piuttosto coerenti con quanto ci si aspettava: sulle prime due domande, relative al moto in diversi sistemi di riferimento, c'è qualche incertezza, mentre la terza e la quarta sono state risolte correttamente dalla quasi totalità degli studenti, segno che, senza l'inserimento di effetti relativistici dati dall'invarianza della velocità della luce, l'esperimento mentale del treno di Einstein non dà alcun problema agli studenti. La distinzione tra l'ordine degli eventi e l'ordine dei fronti d'onda sembra invece meno ovvia, così come l'invarianza della luce in ogni sistema di riferimento, dato che negli ultimi due quesiti le risposte corrette sono inferiori al 25%. Mentre su quest'ultima ci si aspetta un miglioramento dato dall'insegnamento tradizionale in classe, sulla distinzione tra evento e segnale si prevede uno sviluppo delle conoscenze dato dallo svolgimento del Tutorial, dato che questo tema è difficilmente trattato a lezione. Vediamo ora di confrontare questi dati con il post test, costituito dal problema dei vulcani, i cui risultati della classe principale sono riportati in Fig. 5.5:

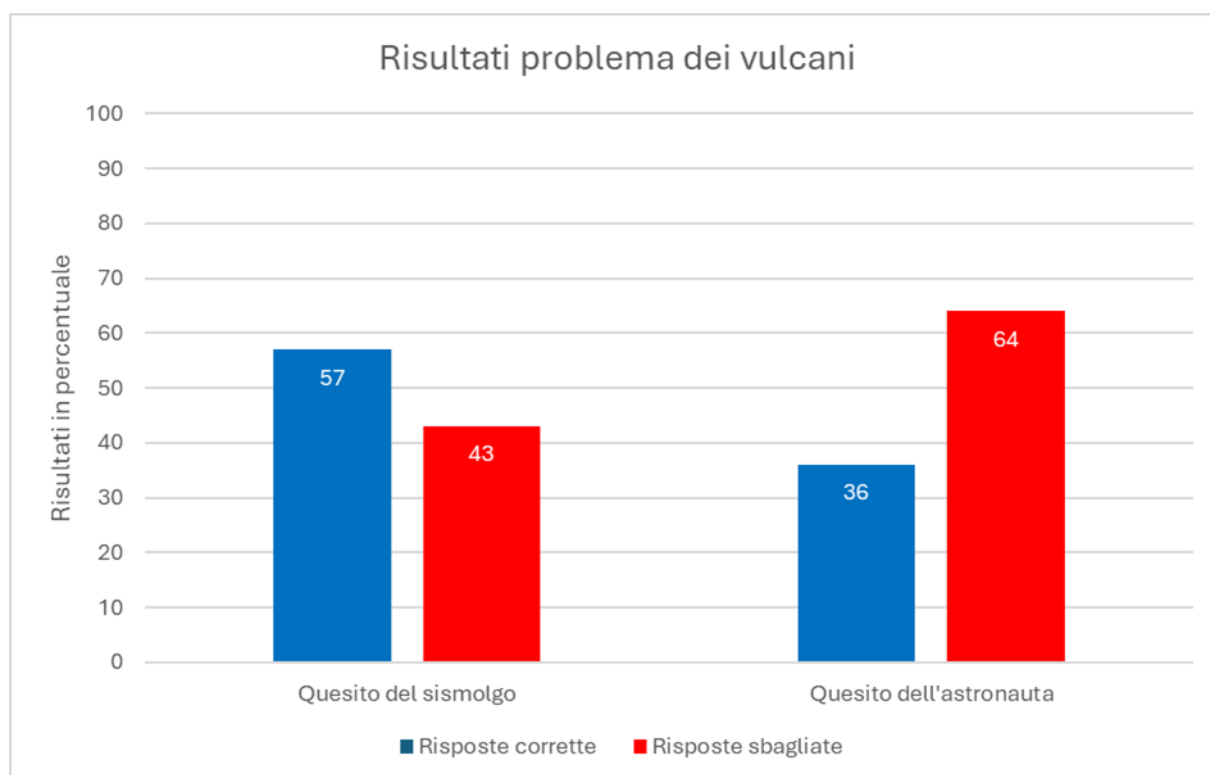


Fig. 5.5: risultati degli studenti della classe principale nel post-test.

Avendo un pre-test fondamentalmente diverso dal post-test, non si possono confrontare direttamente i risultati dei due test, ma un'analisi qualitativa è comunque possibile e indispensabile per analizzare il miglioramento degli studenti.

Innanzitutto, l'invarianza della velocità della luce è un concetto che tutti gli studenti sono riusciti ad apprendere: se nel pre-test per la domanda 6, riguardante proprio questo tema, meno di un quarto della classe è riuscita a rispondere correttamente, nei post-test emerge

chiaramente che per tutti gli studenti è noto che la velocità della luce è una costante, qualsiasi sia il sistema di riferimento considerato. L'idea di elevare a principio di questo concetto aiuta gli studenti a capirne l'importanza, oltre al fatto che la facile applicazione di questo principio negli esercizi scritti rende intuitiva l'applicazione anche nel post-test. È bene specificare che, secondo quanto afferma una ricerca di A. Madsen e colleghi (2017) sui metodi migliori per somministrare i *concept inventories*, nei pre-test si dovrebbero evitare domande su concetti poco familiari agli studenti, perché questi andrebbero a rispondere in modo casuale andando a creare dati poco affidabili. Nonostante ciò, il fatto che ben 13 studenti su 17 abbiano risposto in modo errato porta a pensare che le risposte non siano state dettate dal caso.

Sul confronto tra osservatori in diversi sistemi di riferimento, i risultati sembrano positivi: la percentuale di studenti che ha risposto in modo corretto ad entrambe le domande relative a questo tema nel pre-test (la 1 e la 2) è del 47%, mentre nel quesito dell'astronauta è del 36%, nonostante quest'ultimo fosse molto più difficile, tanto da mettere in difficoltà persino studenti in Fisica in Laurea Magistrale, come è stato visto precedentemente in questa ricerca. Queste domande del pre-test potevano essere risolte anche senza un ragionamento formale, ma basandosi invece sull'esperienza diretta dei moti coinvolti, anche se l'assenza di attrito rendeva più difficile questo approccio. Al contrario, il quesito dell'astronauta non poteva in alcun modo essere risolto con un'esperienza diretta, ma era necessario ragionare sull'ordine con cui i fronti d'onda raggiungono il sismologo in due diversi sistemi di riferimento e utilizzare l'invarianza della velocità della luce, oppure ragionare sulle trasformazioni di Lorentz.

Anche sulla distinzione tra tempo dell'evento e tempo di ricezione del segnale le performance sono migliorate: se nella quinta domanda del pre-test si attestava un 18% di risposte corrette, nel post-test la percentuale sale fino al 57% per il quesito del sismologo ed entrambe le domande trattano il tema di un osservatore più vicino ad una sorgente piuttosto che ad un'altra. Nel post-test, avendo dato agli studenti la possibilità di motivare la propria risposta, si può notare che la domanda è stata affrontata nella maniera corretta e che i concetti chiave sono stati acquisiti: “[...] quindi per l'assistente i due eventi sono simultanei, anche si trova più vicino al Mt. Rainier e quindi vede prima l'evento 1.” Per capire se questi risultati siano frutto di un percorso più approfondito sulla relatività della simultaneità tramite il Tutorial, nel paragrafo successivo si confronteranno questi risultati nel post-test con una classe che non lo ha svolto, per verificare se anche con un insegnamento tradizionale i concetti sarebbero stati ugualmente appresi.

5.3 Confronto tra due classi

In questo paragrafo si confronteranno i risultati delle prove distribuite alla classe principale e a quella secondaria, non solo dal punto di vista della correttezza delle risposte, ma anche del ragionamento utilizzato. Come già anticipato, verranno considerate corrette anche le risposte con un ragionamento incompleto, per poter paragonare, per quanto possibile, i dati acquisiti per questa tesi con quelli da Scherr e colleghi (2002). È bene specificare, in ogni caso, che

questo confronto va considerato con le dovute precauzioni: da una parte ci sono studenti di un liceo scientifico italiano, dall'altra studenti di fisica di un'università americana. Inoltre, si ricorda ancora una volta, il ridotto campione statistico di questa tesi non ha permesso di fare un'analisi statistica delle risposte come fatto da Scherr e colleghi, ma le risposte saranno comunque espresse in percentuale per poterle confrontare con quelle di Scherr e colleghi.

I risultati della domanda sul sismologo sono riportati in Fig. 5.6.

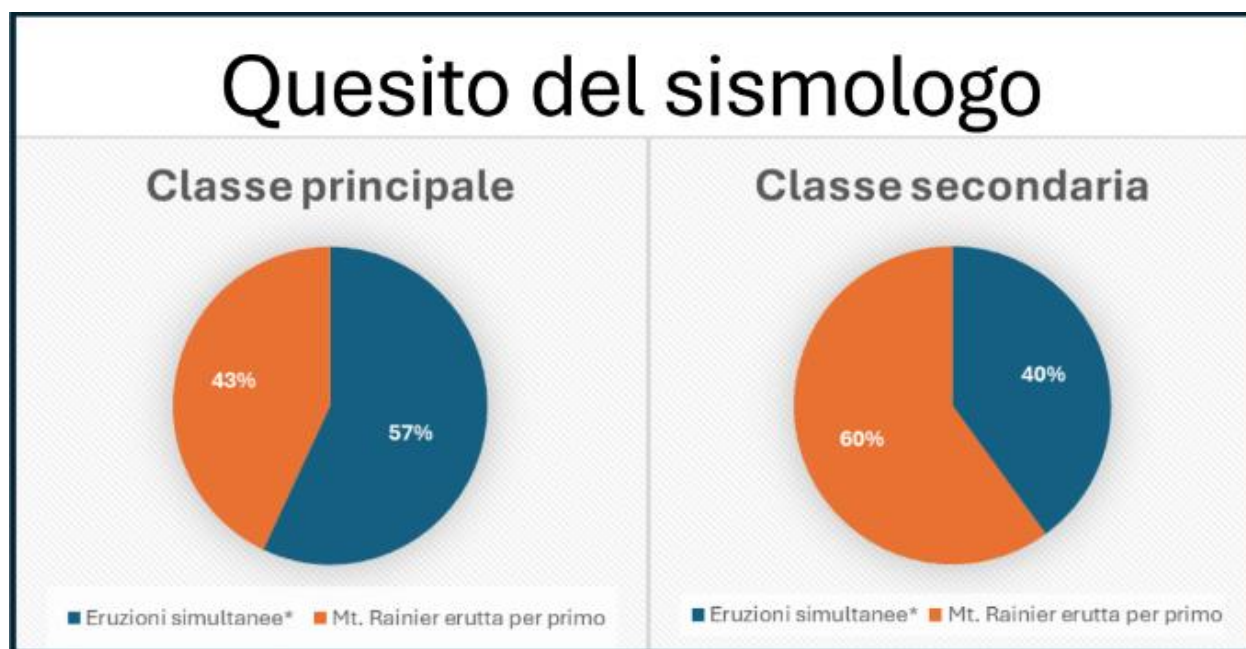


Fig. 5.6: confronto sul quesito del sismologo tra la classe principale e quella secondaria. L'asterisco (*) indica la risposta corretta.

A prima vista, si può notare che il Tutorial ha avuto un impatto positivo sull'andamento delle risposte: nella classe dove è stato svolto, le risposte corrette sono del 57% mentre con un insegnamento tradizionale scendono al 40%. Le risposte non corrette sono molto simili nelle due classi: il Mt. Rainier erutta per primo perché l'assistente si trova più vicino a questo vulcano. Questa spiegazione è coerente se si pensa che l'ordine delle eruzioni dipenda dall'ordine con il quale l'osservatore riceve i segnali dai due eventi, trascurando il fatto che gli osservatori possano calcolare il tempo di propagazione. Questo errore diventa ancora più chiaro se si vanno a leggere le motivazioni portate dagli studenti a sostegno della propria risposta: "Per l'assistente l'eruzione del Mt. Rainier avviene prima di quella del Mt. Hood, perché riceve prima il segnale luminoso proveniente dal Mt. Rainier dato che si trova nelle immediate vicinanze".

È interessante notare come molti di coloro che hanno sbagliato abbiano usato, forse inconsciamente, termini corretti per descrivere la situazione: nei vari ragionamenti, si parla di "informazione 2 che arriva dopo rispetto all'informazione 1 all'assistente", di "ricevere il segnale proveniente dal Mt. Rainier prima di quello proveniente dal Mt. Hood", di "vedere l'evento 1 prima dell'evento 2" e "l'osservatore sarà raggiunto prima dal fronte d'onda luminoso dell'evento 1 e poi da quello dell'evento 2". Tutte queste affermazioni sono effettivamente

corrette, ma non comportano che i due eventi non siano simultanei, piuttosto avvalorano l'ipotesi che ci sia confusione tra tempo dell'evento e tempo di ricezione, nonostante all'inizio del problema sia stato specificato che gli osservatori "sono in grado di determinare il tempo di un evento nel loro sistema di riferimento correggendo per il tempo che impiega il segnale a propagarsi". Non si parla quasi mai di velocità dell'osservatore, quanto piuttosto della sua posizione, che però non è rilevante se si parla di osservatori intelligenti.

Dalle risposte di due studenti della classe secondaria sembra addirittura che la relatività della simultaneità non sia un effetto relativistico, ma causato semplicemente dalla diversa posizione degli osservatori: "Per l'assistente l'evento 1 avviene prima dell'evento 2 perché i due eventi sono simultanei. La simultaneità degli eventi è descritta dal fatto che il sismologo vede i due eventi nello stesso istante quindi, essendo c costante, il tempo t_0 in cui eruttano i vulcani è lo stesso. [...] Essendo l'assistente sotto il Mt. Rainier, vedrà prima l'evento 1 poiché lo spazio che deve percorrere la luce è minore rispetto all'evento 2 e gli eventi non sono simultanei" e anche " [...] e i due eventi non possono essere simultanei per l'assistente perché si trova in un altro sistema di riferimento [rispetto al sismologo]". La convinzione che i sistemi di riferimento in cui si trovano il sismologo e l'assistente siano diversi è presente anche nelle risposte corrette, ma in quest'ultime viene specificato che, essendo in quiete relativa, non viene applicata la relatività della simultaneità.

La differenza tra la classe principale e quella secondaria diventa ancora più evidente nelle risposte corrette: nonostante il numero ridotto di risposte, in quelle della classe principale compare quasi sempre un riferimento al fatto che si stia parlando di osservatori intelligenti: "[gli eventi] avvengono insieme perché l'osservatore è intelligente e li vede correggendo il tempo che il segnale impiega a propagarsi dall'evento 2". Nella classe secondaria, al contrario, spesso la risposta è più coincisa: "avvengono simultaneamente perché l'assistente è fermo". Uno studente ha affermato che le eruzioni sono simultanee, specificando però che ciò è dovuto solamente al fatto che le distanze proposte dal problema non sono sufficienti per notare effetti apprezzabili: " [...] perché considerando la velocità della luce, 300 Km è uno spazio molto piccolo che la luce percorre in un tempo piccolissimo". Da notare, infine, che nella classe secondaria è presente l'unico studente che ha spiegato la simultaneità degli eventi affermando che si sta considerando un solo sistema di riferimento: " [...] poiché il sistema di riferimento è sempre fermo e non in movimento, quindi il sistema di riferimento sarà il medesimo".

Tra tutti gli studenti, solo due della classe principale hanno usato le trasformazioni di Lorentz per dimostrare che gli eventi erano simultanei: "dato che $v_{relativa} = 0$, $\gamma = 1$ quindi $t = t'$ e $x = x'$ ". Con questo stesso ragionamento, sono riusciti a rispondere correttamente anche alla domanda dell'astronave, dove molti altri hanno incontrato notevoli difficoltà.

Come già anticipato, si vuole provare a fare un confronto con gli studenti dell'università di Washington: quindi, in Tab. 5.7, i risultati raccolti (già in Fig. 5.6) sono affiancati a quelli della ricerca americana e sono riportati anche in Fig. 5.8 sotto forma di istogramma.

Tab. 5.7: risultati degli studenti sulla domanda del sismologo. Nella prima colonna sono presenti i risultati della classe principale di questo studio, nella seconda i risultati ottenuti da Scherr e colleghi con gli studenti che hanno svolto il tutorial. Nella terza colonna sono presenti i risultati della classe secondaria di questo studio, mentre nell'ultima i risultati ottenuti da Scherr e colleghi con gli studenti che non hanno svolto il tutorial.

Quesito del sismologo	Classe principale (N=14)	Introductory students with tutorial instruction (N=197)	Classe secondaria (N=20)	Introductory students without tutorial instruction (N=79)
Risposta corretta (eruzioni simultanee) a prescindere dal ragionamento	57%	85%	40%	32%
Il Mt. Rainier erutta per primo	43%	14%	60%	62%
Altro (il Mt. Hood erutta per primo, le informazioni date non sono sufficienti, ...)	0%	0%	0%	6%

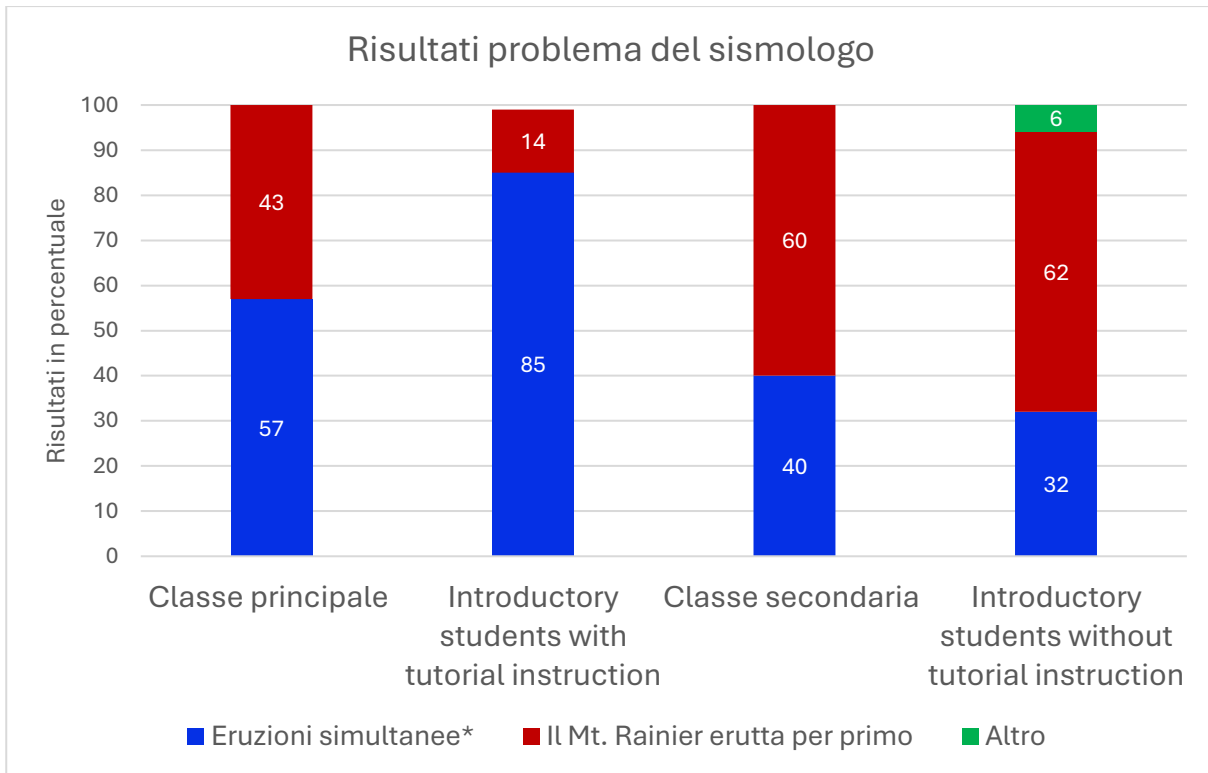


Fig. 5.8: istogramma che rappresenta i risultati del problema del sismologo acquisiti in questa tesi confrontati con quelli di Scherr e colleghi (2002). La risposta corretta è segnata con un asterisco (*).

I risultati della classe secondaria sono molto simili a quelli degli *introductory students* a cui non era stato somministrato il Tutorial, segno che il paragone tra queste categorie può essere adeguato e che la confusione tra tempo dell'evento e ricezione del fronte d'onda sia ugualmente presente tra gli studenti che hanno ricevuto un insegnamento tradizionale, indipendentemente dal contesto scolastico o dall'insegnante. Se si analizzano i dati di chi ha svolto il Tutorial, invece, si nota che le performance degli studenti americani sono superiori a quelle dei liceali italiani: questo non vuol dire che il Tutorial non sia stato un metodo didattico efficace, come dimostrato precedentemente dal confronto tra classe secondaria e principale e dal miglioramento, anche qualitativo, delle risposte di quest'ultima.

Le cause di questa discrepanza con i dati riportati da Scherr e colleghi possono essere diverse: innanzitutto nella ricerca americana gli studenti hanno svolto due Tutorial ("Events and reference frames" e "Simultaneity") in un arco di tempo di due ore, mentre in questa ricerca è stata utilizzata una sola ora per completare una versione riadattata di *Simultaneity*. Se infatti il Tutorial utilizzato si concentra sulla simultaneità tra due sistemi di riferimento differenti, *Events and reference frames* si focalizza piuttosto sulla determinazione del tempo di un evento e sul ruolo degli osservatori in un singolo sistema di riferimento, che è proprio l'argomento del quesito del sismologo. Risulta perciò naturale pensare che chi ha completato entrambi i Tutorial risultasse avvantaggiato in questa domanda. È poco probabile che le risposte corrette siano in minor numero a causa della rielaborazione del Tutorial originale: essa, infatti, è stata

costruita appositamente per essere più breve della versione iniziale mantenendo i nodi concettuali, come mostrato nel paragrafo 3.5.

Per quanto riguarda la domanda sull'astronave, invece, i risultati sono riportati in Fig. 5.9.

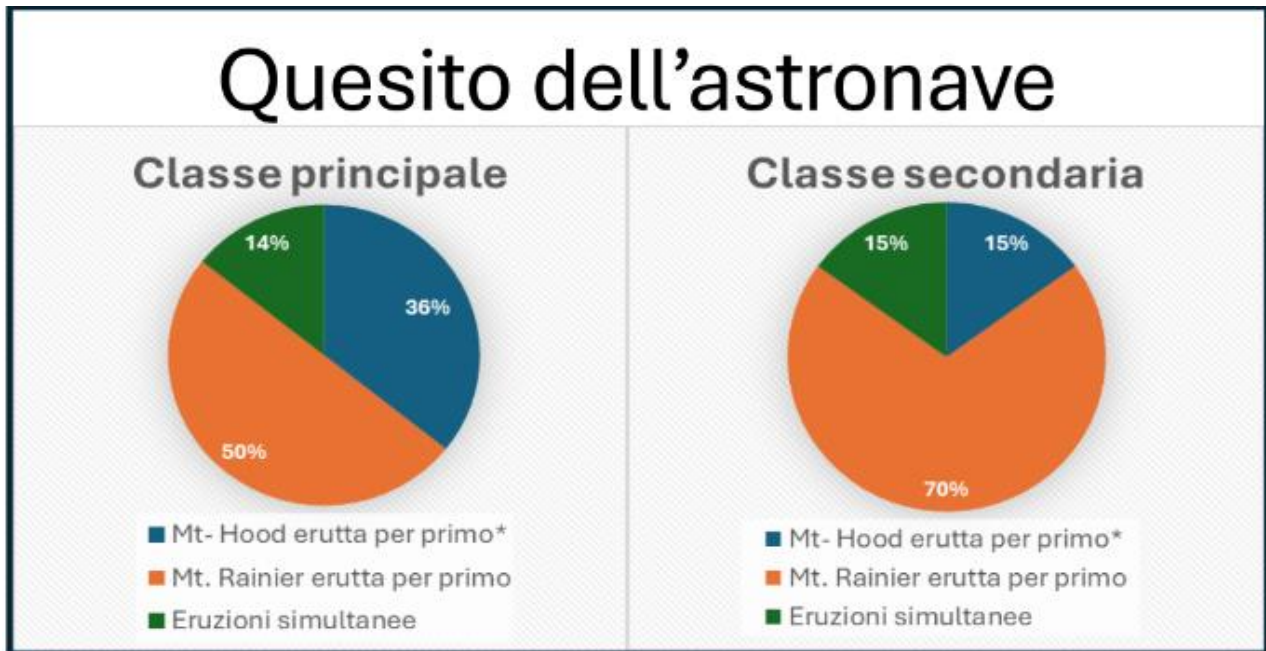


Fig. 5.9: confronto sul quesito dell'astronave tra la classe principale e quella secondaria. L'asterisco (*) indica la risposta corretta.

Ancora una volta, si possono notare gli effetti positivi del Tutorial sull'andamento delle risposte: il 36 % degli studenti che lo ha svolto ha risposto correttamente, mentre lo stesso dato scende al 15% per chi ha ricevuto un insegnamento tradizionale. Anche in questa domanda, è chiaro il motivo che ha spinto la maggioranza ad affermare che il Mt. Rainier erutti per primo: specificando che l'astronave si trova esattamente sopra a questo vulcano, chi pensava che il tempo dell'evento coincidesse con quello di ricezione del segnale ha capito che il fronte d'onda proveniente dal Mt. Hood giunge per secondo all'astronave: "Poiché [l'astronave] viaggia ad una velocità minore di quella della luce, l'evento 1 raggiunge l'astronauta prima del 2". Chiaramente parlare di evento che "raggiunge" l'astronave conferma la presenza di questa misconcezione.

Questa volta molti studenti hanno trovato somiglianze con altri esercizi svolti in classe; quindi, hanno impostato il problema appuntando i dati e scrivendo una formula di relatività ristretta per provare a farsi guidare nel ragionamento, in particolare la definizione del fattore di Lorentz, la dilatazione temporale o la contrazione delle lunghezze. La presenza di alcuni dati numerici ($v_{astronave} = 0.8c$ e quindi $\gamma = \frac{5}{3}$) li ha portati anche a provare a svolgere dei calcoli, spesso senza successo perché non capivano il significato delle formule che utilizzavano e perché erano poco rilevanti con il quesito. Infatti, il problema si poteva risolvere quantitativamente solo applicando in modo corretto le trasformazioni di Lorentz: due studenti della classe

principale, unici ad aver utilizzato questo metodo, sono riusciti a risolvere correttamente il quesito trovando che il Mt. Hood erutta 1.33 ms prima del Mt. Rainier.

Per arrivare ad una soluzione di tipo qualitativo con un ragionamento completo si doveva pensare al fatto che, nel sistema di riferimento dell'astronave, il sismologo si muove verso il Mt. Rainier quindi per percepire contemporaneamente i due fronti d'onda quello dal Mt. Hood deve essere generato per primo. Nessuno studente ha risposto in maniera completa a questa domanda: nel motivare la propria risposta, tutti si sono limitati a scrivere che il Mt. Rainier erutta dopo il Mt. Hood perché l'astronave si sta avvicinando a quest'ultimo, senza scendere nei particolari. Anche se all'interno di questa ricerca tali risposte saranno annoverate come corrette, questo fa pensare che il problema della simultaneità non sia stato compreso completamente e che se l'astronave si fosse trovata in una posizione diversa, tale da essere in avvicinamento ad entrambi i vulcani, la risposta sarebbe cambiata portando ad un errore.

Alcune risposte particolarmente sbagliate dal punto di vista concettuale arrivano dalla classe secondaria: uno studente ha affermato, senza meglio precisare, che l'astronauta si trovasse in un sistema di riferimento non inerziale (forse confondendosi con il caso, studiato a lezione, del paradosso dei gemelli) e che quindi il Mt. Rainier eruttasse per primo. Un altro, similmente a come aveva risposto al quesito sul sismologo, ha dichiarato che, con i dati proposti dal problema, non è possibile vedere alcuna differenza di tempo apprezzabile. L'errore più grave proviene da un alunno che ha scritto che "il Mt. Hood erutta per primo, poiché $\Delta t' = \gamma \Delta t$ dove Δt è il tempo proprio relativo al Mt. Hood e $\Delta t'$ relativo al Mt. Rainier, quest'ultimo sarà maggiore perché $\frac{5}{3}\Delta t > \Delta t$ ". Sembra comunque che non sia il solo a non aver capito il significato della dilatazione temporale e che il tempo dilatato faccia riferimento a due sistemi di riferimento, invece che a due eventi.

Ancora una volta, nella classe principale si fa spesso riferimento agli osservatori intelligenti, anche se non sempre nel modo corretto: se infatti da una parte c'è chi lo ha specificato per confermare la non simultaneità degli eventi, altri hanno affermato che, grazie alla loro capacità di determinare il tempo di un evento correggendo per il tempo di propagazione del segnale, tutti gli osservatori riescono a interpretare la simultaneità come assoluta, nonostante i fronti d'onda vengano percepiti con un certo ordine. Nella classe secondaria, al contrario, uno studente afferma: "[...] l'astronauta non fornendosi di mezzi di rilevazione che tengano conto della distanza e della velocità, percepisce prima l'evento 1", pensando che un osservatore possa fare affidamento solo alla propria esperienza sensoriale per determinare il tempo dell'evento.

In Tab. 5.10, i risultati raccolti sono affiancati a quelli presi dall'università di Washington, per poter fare nuovamente un paragone e sono riportati anche in Fig. 5.11.

Tab. 5.10: risultati degli studenti sulla domanda dell'astronave. Nella prima colonna sono presenti i risultati della classe principale di questo studio, nella seconda i risultati ottenuti da Scherr e colleghi con gli studenti che hanno svolto il tutorial. Nella terza colonna sono presenti i risultati della classe secondaria di questo studio, mentre nell'ultima i risultati ottenuti da Scherr e colleghi con gli studenti che non hanno svolto il tutorial.

Quesito dell'astronave	Classe principale (N=14)	Introductory students with tutorial instruction (N=173)	Classe secondaria (N=20)	Introductory students without tutorial instruction (N=73)
Risposta corretta (erutta prima Mt. Hood) a prescindere dal ragionamento	36%	51%	15%	11%
Il Mt. Rainier erutta per primo	50%	40%	70%	75%
Le eruzioni sono simultanee	14%	1%	15%	7%
Altro (le informazioni date non sono sufficienti, ...)	0%	7%	0%	7%

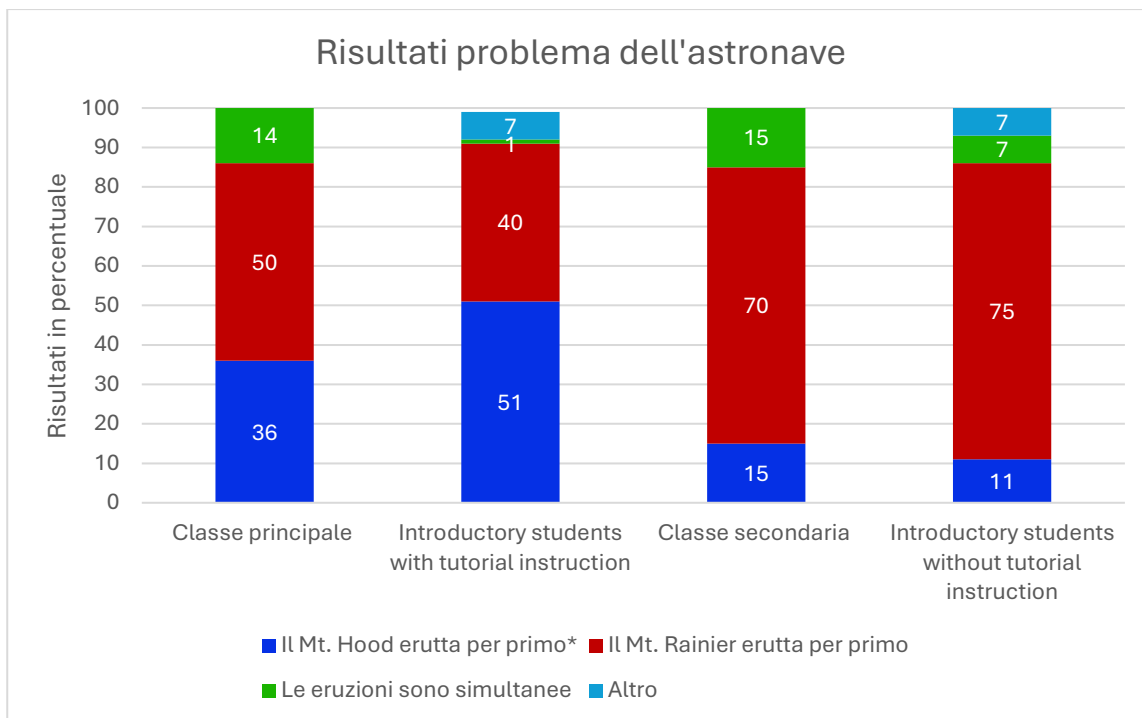


Figura 5.11: istogramma che rappresenta i risultati del problema del sismologo acquisiti in questa tesi confrontati con quelli di Scherr e colleghi (2002). La risposta corretta è segnata con un asterisco (*).

Anche in questa domanda, i risultati della due categorie di studenti che hanno ricevuto un insegnamento tradizionale sono molto simili tra loro, anche più del quesito del sismologo: le performance in generale sono molto più basse rispetto alla prima domanda, perché è necessario un ragionamento più articolato (che, questa volta, necessita un precedente studio di relatività ristretta) e perché l'ordine degli eventi è esattamente l'opposto di quello di ricezione dei fronti d'onda. In questa domanda, il miglioramento degli studenti che hanno svolto il Tutorial rispetto a quelli che non lo hanno fatto è più marcato che in quella precedente ed è più simile a quello riscontrato negli *Introductory students*. Perciò sembra sempre più convincente l'ipotesi presentata precedentemente, ovvero che ognuno dei due Tutorial originali possa sviluppare le capacità degli studenti in due aspetti diversi della relatività: il miglioramento in ogni domanda dipende da quale Tutorial si è completato.

Gli effetti del Tutorial si possono comunque considerare soddisfacenti, dato che il miglioramento delle prestazioni è notevole nonostante sia stata utilizzata una sola ora di lezione. Ciononostante, è possibile che se si fosse svolto anche *Events and reference frames* gli studenti avrebbero compreso maggiormente il ruolo giocato dagli osservatori intelligenti e di come riescono a calcolare il tempo di un evento, andando a migliorare le performance anche nel secondo quesito oltre che, come già appurato, nel primo.

La differenza maggiore tra i due set di dati è tra coloro che hanno considerato la simultaneità come assoluta: non solo nella ricerca americana questa risposta è molto più rara, ma la differenza tra i liceali che hanno svolto il Tutorial e quelli che non lo hanno fatto è quasi

impercettibile. Per gli studenti della classe principale, l'errore è stato causato dall'eccessiva importanza data agli osservatori intelligenti, pensando che la loro capacità di correggere il tempo di un evento rimuovendo il tempo di propagazione del segnale potesse essere, in qualche modo, "superiore" alla relatività della simultaneità come studiata a lezione: il fatto che la simultaneità non sia vista dagli studenti come qualcosa di ontologico, relativo al sistema di riferimento, ma solo come una diversa percezione di un osservatore causata dalla sua velocità relativa, diventa ancora più chiaro analizzando il lessico usato: "Gli eventi sono simultanei, ma l'astronave percepisce prima l'evento 1 perché si trova più vicina al Mt. Rainier. Però l'astronauta è intelligente e capisce che gli eventi sono in realtà simultanei." Sembra implicita la convinzione che il sistema di riferimento del sismologo sia quello "corretto" e poiché gli eventi sono simultanei in quel sistema di riferimento, tutto ciò che vedono altri osservatori sarà diverso e "sbagliato" a causa del sistema di riferimento differente in cui si trovano.

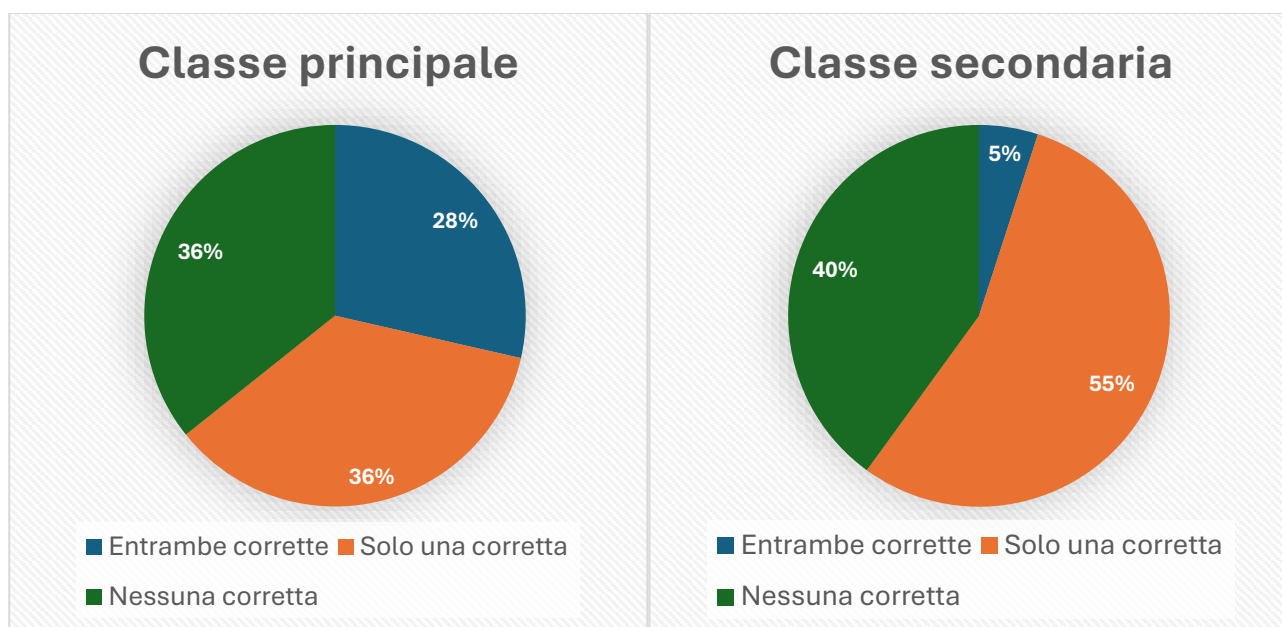


Fig. 5.12: confronto sul numero di risposte corrette nelle domande del sismologo e dell'astronave.

Guardando Fig. 5.12 si può notare che la percentuale degli studenti che non hanno risposto correttamente alle domande è molto simile nelle due classi: nella maggior parte dei casi, si tratta di studenti che hanno interpretato il tempo dell'evento come il tempo di ricezione del fronte d'onda. Nonostante nel riadattamento del Tutorial sia stato appositamente inserito un terzo osservatore (Charles) anche per sottolineare questo aspetto, sembra che l'associazione di questi due concetti differenti sia profondamente radicata negli studenti, tanto che non è bastato il Tutorial per far cogliere a pieno questa distinzione, dato che nella classe secondaria questo errore è ugualmente presente.

Più incoraggiante è invece la percentuale di alunni che ha risposto correttamente ad entrambe le domande: mentre nella classe secondaria un solo studente ci è riuscito, nella

classe principale questo dato è molto più alto. Questo, unito al fatto che le spiegazioni delle risposte nella classe secondaria erano spesso coincise o poco coerenti, porta a credere che qualche studente, in questa classe, abbia risposto in maniera casuale, riuscendo così a sbagliare solamente uno dei due quesiti. In alternativa, alcuni potrebbero aver intuito che l'esercizio celava un tranello legato alla ricezione di un fronte d'onda prima dell'altro e che quindi la risposta più ovvia non fosse quella corretta, ma senza comprendere a pieno la fisica dietro alle proprie scelte. Questo stesso ragionamento potrebbe essere riproposto per la classe principale, ma poiché la disparità tra gli studenti che hanno risposto ad un solo quesito e quelli che hanno risposto correttamente ad entrambi è significativamente minore, l'ipotesi della casualità sembra più improbabile. Inoltre, le argomentazioni sono quasi sempre coerenti con la risposta data; quindi, si può pensare che siano state acquisite le conoscenze necessarie per rispondere.

Capitolo 6

Conclusioni

L'indagine condotta nel corso di questa tesi ha permesso un'analisi delle difficoltà concettuali che gli studenti possono incontrare nello studio della relatività della simultaneità. Come confermato dai ricercatori in didattica della fisica (Scherr et al., 2002; Olsho, 2017), dopo un insegnamento tradizionale è molto comune riconoscere tra gli studenti una posizione per cui le idee di simultaneità relativa e assoluta riescono a convivere, applicate anche contemporaneamente in uno stesso contesto e dove una viene scelta a scapito dell'altra a seconda della domanda. Un'altra difficoltà che si trova frequentemente consiste nel trattare l'ordine degli eventi come scandito dall'ordine della ricezione dei fronti d'onda, dando così priorità alla posizione di un osservatore piuttosto che alla sua velocità.

Grazie all'esperienza svolta con gli studenti del corso di Laurea Magistrale in Fisica, è stato possibile constatare la presenza di queste difficoltà attraverso la risoluzione del problema dei vulcani e la somministrazione della versione originale del Tutorial, osservando da vicino le incertezze degli studenti e riuscendo quindi a individuare gli aspetti migliorabili del Tutorial. È stato quindi possibile svilupparne una rielaborazione adatta a studenti liceali, modificandone in modo opportuno il contenuto e le tempistiche richieste per il completamento. Attraverso l'osservazione diretta, sono stati monitorati i progressi di una classe quinta di Liceo che per la prima volta ha affrontato la relatività ristretta nel percorso di studi, utilizzando la nuova versione del Tutorial come metodo didattico e il problema dei vulcani per esaminare le competenze sviluppate nello studio della relatività della simultaneità. Attraverso l'analisi delle risposte degli studenti e il confronto con una classe che ha ricevuto un insegnamento standard, si può confermare l'impatto positivo generato dal Tutorial nell'apprendimento, dato che gli studenti che rispondono in maniera corretta e con un'argomentazione coerente sono notevolmente più numerosi, avvicinandosi alle performance di un gruppo di studenti universitari americani presenti in letteratura (Scherr et al., 2002). I risultati suggeriscono che un piccolo investimento di tempo (un'ora scolastica) richiesto per completare il Tutorial può migliorare la capacità degli studenti nel risolvere problemi quantitativi sulla relatività della simultaneità.

Bibliografia

- Scherr, R. E., Shaffer, P.S., Vokos, S. (2001). Simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics* 69, S24–S35. <https://doi.org/10.1119/1.1371254>
- Scherr, R. E., Shaffer, P.S., Vokos, S. (2002) The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics* 70, 1238–1248. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1509420>
- Alstein, P., Krijtenburg-Lewerissa, K., & van Joolingen, W. R. (2021). Teaching and learning special relativity theory in secondary and lower undergraduate education: A literature review. *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 17, 023101 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.023101>
- Panse, S., Ramadas, J., & Kumar, A. (1994) Alternative conceptions in Galilean relativity: Frames of reference. *Int. J. Sci. Educ.* 16, 63. <https://doi.org/10.1080/0950069940160105>
- Ramadas, J., Barve, S., & Kumar, A. (1996), Alternative conceptions in Galilean relativity: Inertial and non-inertial observers. *Int. J. Sci. Educ.* 18, 615. <https://doi.org/10.1080/0950069960180509>
- Ramadas, J., Barve, S., & Kumar, A. (1996) Alternative conceptions in galilean relativity: Distance, time, energy and laws. *Int. J. Sci. Educ.* 18, 463. <https://doi.org/10.1080/0950069960180405>
- Pietrocola, M., & Zylbersztajn, A. (1999) The use of the principle of relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students, *Int. J. Sci. Educ.* 21, 261 <https://doi.org/10.1080/095006999290697>
- A. Bandyopadhyay, Students' ideas of the meaning of the relativity principle, *Eur. J. Phys.* 30, 1239 (2009). <https://doi.org/10.1088/0143-0807/30/6/004>
- Tanel, Z. (2014). Student difficulties in solving problems concerning special relativity and possible reasons for these difficulties. *Journal of Baltic Science Education*, 13, 573–582. <http://dx.doi.org/10.33225/jbse/14.13.573>
- Scherr, R. E. (2001b). An investigation of student understanding of basic concepts in special relativity. Thesis (Ph.D.) University of Washington.
- David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker. “Fondamenti di fisica”, quarta edizione.
- John D Cutnell, Kenneth W Johnson, David Young, Shane Stadler. “La fisica di Cutnell e Johnson.azzurro”
- Olsho, A. R. W. (2017). An Investigation of Introductory Student Understanding of Special Relativity in the Context of the Relativity of Simultaneity. Thesis (Ph.D.) University of Washington

Aslanides, J. S., & Savage, C. M. (2013). The Relativity Concept Inventory: development, analysis and results. *Phys. Rev. ST Physics Ed. Research* 9, 010118 (2013).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.9.010118>

Albert Einstein, 1905. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* 17 (1905): 891–921.

Madsen, A., McKagan, S. B., & Sayre, E. C. (2017). Best practices for administering concept inventories. *The Physics Teacher*, 55(9), 530-536. <https://doi.org/10.1119/1.5011826>

Liceo scientifico Enrico Fermi Bologna. Piano Triennale dell'Offerta Formativa – 2019/2022.
<https://www.liceofermibo.edu.it/documento/piano-triennale-dellofferta-formativa/>

Ringraziamenti

Ringrazio la professoressa Olivia Levrini e la professoressa Sara Satanassi per avermi dato la possibilità di svolgere questa tesi, in particolare per l'esperienza molto formativa in laurea magistrale, per avermi sempre supportato lungo la scrittura della tesi e per tutto il tempo che mi hanno dedicato.

Ringrazio anche il professor Pettinato per avermi accolto nella sua classe per diversi mesi, trattandomi come un suo pari e facendomi capire cosa si prova a stare dall'altra parte della cattedra.

Ringrazio i miei genitori, mia sorella, la mia ragazza e tutta la mia famiglia per avermi sostenuto in tutti i modi lungo questo percorso di tre anni.

Ringrazio i miei amici fisici per il loro supporto a lezione e il loro fondamentale aiuto prima degli esami.

Ringrazio, infine, tutti i miei amici che mi hanno alleggerito la pressione data dagli esami (e non solo) e che hanno reso più facile il mio percorso.